

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN RUEDAS DE FERROCARRIL

Autor del trabajo: Alberto Lozano Morote

Director del trabajo: Dr. Julio Álvarez Rodríguez

JUNIO 2012



ÍNDICE GENERAL

Lista de figuras

Lista de tablas

ÍNDICE GENERAL	II
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABLAS.....	XIII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 CONTENIDOS	3
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO	4
2.1 OBJETIVOS	5
CAPÍTULO 3: LA RUEDA FERROVIARIA	6
3.1 INTRODUCCIÓN	7
3.2 PARTES DE UNA RUEDA.....	7
3.3 TIPOS DE RUEDA	8
3.4 PARÁMETROS A CONTROLAR	10
3.5 FABRICACIÓN DE RUEDAS	12
3.5.1 Proceso de forjado y laminado	12
3.5.2 Tratamiento térmico	15
3.6 ESFUERZOS QUE SOPORTAN LAS RUEDAS	17
3.7 TIPOS DE DAÑO EN RUEDA	18
3.7.1 Desgaste.....	18
3.7.1.1 Desgaste en la banda de rodadura.....	18
3.7.1.2 Desgaste de la pestaña	20
3.7.2 Fatiga	21
3.7.2.1 “Rolling Contact Fatigue”	21
3.7.2.2 Fatiga subsuperficial.....	23
3.7.2.3 Defectos en el velo	25
3.7.2.4 Defectos en el cubo.....	26
3.7.3 Deformación	26

3.7.3.1 Deformación lateral en la barra de rodadura	26
3.7.3.2 Colapso local de la banda de rodadura	27
3.7.3.3 Planos de rueda.....	28
3.7.3.4 Deformación de la punta de la pestaña.....	31
3.7.3.5 Desprendimiento en la pestaña	31
3.7.4 Térmico.....	32
3.7.4.1 Sobrecarga térmica	33
3.7.4.2 Fisuras térmicas laterales.....	33
3.7.5 Infraestructura.....	35
3.7.5.1 Marcas en la banda de rodadura	35
3.8 MECANISMOS DE AGRIETAMIENTO EN RUEDA	36
3.8.1 Fisuras superficiales “Spalling”.....	37
3.8.2 Exfoliaciones “Shelling”	39
3.8.3 Inclusiones profundas “Shattering”	40
3.8.4 Fisuras térmicas	41
CAPÍTULO 4: MECÁNICA DE LA FRACTURA EN RUEDAS FERROVIARIAS	43
4.1 INTRODUCCIÓN	44
4.2 MEDIDA DE LA TENACIDAD DE FRACTURA EN ACEROS R7	45
4.3 MEDIDA DE LA TENACIDAD DE FRACTURA POR EL MÉTODO ESTÁNDAR	47
4.4 MEDIDA DE LA TENACIDAD DE FRACTURA POR OTROS PARÁMETROS.....	50
4.4.1 Integral-J	52
4.4.2 K_{EE} (metodología de energía equivalente).....	53
CAPÍTULO 5: INSPECCIÓN DE RUEDAS FERROVIARIAS.....	56
5.1 INTRODUCCIÓN	57
5.2 INSPECCIÓN VISUAL	58

5.3 ANÁLISIS ACÚSTICO	59
5.4 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.....	59
5.5 CORRIENTES DE EDDY	60
5.6 LÍQUIDOS PENETRANTES.....	61
5.7 RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL: RAYOS γ Y RAYOS X	64
5.8 TÉCNICA DE VIBRACIONES	67
5.8.1 Análisis de un plano en la superficie de rodadura	67
5.8.1.1 Introducción.....	67
5.8.1.2 Dominio temporal.....	69
5.8.1.3 Dominio frecuencial	71
5.8.1.4 Dominio conjunto tiempo-frecuencia.....	71
5.8.1.5 Conclusiones del estudio	73
5.9 TÉCNICAS DE ULTRASONIDOS	74
5.9.1 Principios acústicos	74
5.9.1.1 Definiciones básicas	74
5.9.1.2 Comportamiento de ondas sónicas en superficies límite.....	77
5.9.1.3 Dispersión, difracción e interferencia.....	80
5.9.1.4 Disminución de la presión sónica.....	81
5.9.2 Principios básicos de los instrumentos	82
5.9.2.1 Generación de ultrasonido	83
5.9.2.2 Procedimiento de ensayo ultrasónico	84
5.9.2.3 Palpadores.....	87
5.9.2.4 Sistemas de representación	93
5.9.2.5 Interpretación de la representación Tipo A	94
5.9.3 Procedimientos generales del ensayo ultrasónico	96
5.9.4 Ventajas y limitaciones.....	97
5.10 MÉTODOS USADOS ACTUALMENTE	97

5.10.1 Método “Phased Array”	97
5.10.2 Sistema desarrollado en Australia para la Hamersley Iron Railways.....	98
5.10.3 Sistema utilizado por la SNCF para las ruedas del TGV	99
5.10.4 Sistema utilizado por la Deutsche Bahn para las ruedas del ICE.....	100
5.10.5 Sistema utilizado en torno de foso (Eurostar)	101
5.10.6 Sistemas de ultrasonidos para inspeccionar ruedas tras el torneado (sistema desarrollado por la empresa Union Pacific Railroad).....	101
5.10.7 Sistema utilizado por Renfe para la inspección del velo	104
5.10.8 Sistemas EMATs	105
5.10.9 Sistemas que miden el campo de tensiones residual	105
5.10.10 Sistemas de ultrasonidos para ruedas nuevas	107
5.11 INSPECCIÓN DE DISCONTINUIDADES EN BANDA DE RODADURA EN RUEDAS CIVIA	107
5.11.1 Equipos y materiales.....	107
5.11.2 Gráficas de referencia.....	108
5.11.3 Método de medición de discontinuidades	111
5.11.4 Preparación de informes	115
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	117
6.1 CONCLUSIONES	118
6.2 TRABAJOS FUTUROS	119
CAPÍTULO 7: REFERENCIAS	120

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

<i>Figura 3.1 Partes de una rueda.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3.2 Rueda monobloque.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3.3 Rueda con centro y bandaje.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3.4 Rueda elástica.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3.5 Parámetros a controlar.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3.6 Ovalamiento.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3.7 Distancia entre caras internas.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3.8 Preforma en blanco con presa.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3.9 Colocación de las herramientas para conseguir el perfil de rueda requerido.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.10 Operación de conformado.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.11 Rueda deformada en prensa.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.12 Carga de las ruedas acabadas en una línea de transporte.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.13 “HollowWear”.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3.14 Desgaste moderado en la cara de la pestaña.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.15 RCF. Localizaciones relativas a zonas de la rueda.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.16 Desarrollo de RCF dentro de una curva.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.17 Fisura por fatiga subsuperficial que causa la pérdida de una sección de la pestaña así como de la banda de rodadura.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.18 Fisura por fatiga subsuperficial que se ha propagado sobre la cara de la llanta.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.19 Pérdida de material en una zona de la banda de rodadura debido a una fisura subsuperficial.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.20 Fisura circunferencial desarrollada en el velo de una rueda.....</i>	<i>26</i>

<i>Figura 3.21 Deformación lateral en la barra de rodadura.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.22. Vista cercana del plano en la rueda por donde las fisuras se han iniciado dentro de la zona afectada por el calor.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.23 Representación esquemática de una sección de corte de un plano de rueda.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.24 Plano de rueda por el bloqueo del eje que ha comenzado a fisurarse superficialmente.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.25 Plano de rueda.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.26 Plano de rueda con desprendimiento.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.27 Pestaña con choques en su extremo.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.28 Representación esquemática de la interacción de la parte alta de la pestaña con un carril que tiene un nivel significativo de parte cortante.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.29 Desprendimiento de la pestaña.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.30 Rueda que ha sufrido una sobrecarga térmica.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.31 Fisura lateral térmica.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.32 Llanta fisurada tras un sobrecalentamiento.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.33 Marcas debidas a cuerpos extraños presentes en el carril.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.34 Marcas debidas a arena.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.35 Desprendimiento en la banda de rodadura producido por “Spalling”.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.36 Fallo en rueda por “Shattering”.....</i>	<i>41</i>

CAPÍTULO 4

<i>Figura 4.1 Rueda fracturada por el descarrilamiento de Stein-Säckingen.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.2 Superficie final de fractura con el inicio de la fisura crítica (círculo).....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.3 Factor intensidad de tensiones en función de la longitud de fisura para diferentes tensiones.....</i>	<i>47</i>

<i>Figura 4.4 Probeta CT y orientación dentro de la llanta de rueda.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.5 Curva de carga frente a desplazamiento para un ensayo válido de K_{IC} acorde con la norma.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.6 Curva de carga frente a desplazamiento con un incremento adicional en el desplazamiento y con deformación plástica.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.7 Criterio LEFM, aplicado en casos de pequeñas zonas plásticas en extremo de fisura.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.8 Criterio PYFM, aplicado en casos de una gran zona plástica en el extremo de la fisura.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.9 Curva de carga-desplazamiento para el ensayo de K_{EE} acorde a ASTM E992.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.10 Combinación de resistencia y tenacidad de varios aceros. El área sombreada indica el acero R7.....</i>	<i>55</i>

CAPÍTULO 5

<i>Figura 5.1 Inspección con partículas magnetizables.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.2 Posición de los sensores de corrientes de Eddy.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.3 Inspección por líquidos penetrantes visible (izq) y fluorescente (drcha)</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.4 Diagrama general de la aplicación de líquidos penetrantes.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.5 Sistema electrónico para visualización de rayos X.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.6 Técnica radiográfica.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.7 Diagnósis de defectos mediante vibraciones.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.8 Montaje experimental con el acelerómetro en el interior del utillaje y el sensor extensiométrico.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.9 Registros temporales de vibración del tren con un plano (3028) y sin planos (2016) y ubicación del instante de paso de cada rueda del tren a partir de la señal del sensor extensiométrico.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.10 Espectros de energía para el tren 2016 (en rojo) y para el tren 3028 (en azul)...71</i>	

<i>Figura 5.11 Espectrograma de una señal de vibración producida por el tren 3028.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.12 Oscilación de un péndulo.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.13 Oscilaciones amortiguada y no amortiguada.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.14 Espectro acústico.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.15 Incidencia normal del sonido en la interfase entre dos medios.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.16 Incidencia oblicua de una onda sónica.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.17 Dispersión y difracción de ondas en obstáculos.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.18 Reducción de la presión sónica causada por la divergencia.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.19 Método por transmisión.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.20 Formación de ecos múltiples.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 5.21 Ecos múltiples causados por el eco de fondo y un defecto.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5.22 Vibración de un cristal débilmente atenuado y otro fuertemente atenuado (arriba). La misma señal sobre la pantalla de TRC después de rectificado y filtrada (abajo).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5.23 Diagrama del haz ultrasónico.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5.24 Corte de un palpador normal.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5.25 Palpador de doble cristal tipo E-R.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5.26 Corte de un palpador angular.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5.27 Representación Tipo A.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.28 Representación Tipo B.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.29 Representación Tipo C.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.30 Influencia de la orientación de los defectos.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5.31 Zonas de localización de grietas en la empresa Hamersley Iron Pty Ltd en Australia.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 5.32 Zonas a controlar según normativas internas de la SNCF.....</i>	<i>100</i>

<i>Figura 5.33 Robot utilizado para acoplar los palpadores a las ruedas ICE en el taller de Berlín-Rummersburg.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5.34 Posición de los palpadores y de la cubeta de inspección.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.35 Inspección de la zona de llanta.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.36 Inspección en busca de defectos “shattering”</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.37 Inspección en busca de grietas térmicas en la zona exterior.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 5.38 Inspección en busca de grietas térmicas en la banda de rodadura.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 5.39 Inspección en busca de grietas térmicas en la pestaña.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 5.40 Vista general de palpadores.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5.41 Posicionamiento de los palpadores para la completa detección de grietas en el velo.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5.42 Posición de los palpadores EMATs.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 5.43 Medida de las tensiones de una rueda nueva.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 5.44 Reflector de Ø 3mm a 21 mm de profundidad.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5.45 Reflector de Ø 3mm a 16 mm de profundidad.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5.46 Reflector de Ø 3mm a 11 mm de profundidad.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 5.47 Reflector de Ø 3mm a 6 mm de profundidad.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 5.48 Medición de la discontinuidad (Paso 1)</i>	<i>111</i>
<i>Figura 5.49 Medición de la discontinuidad (Paso 2)</i>	<i>112</i>
<i>Figura 5.50 Medición de la discontinuidad (Paso 3)</i>	<i>112</i>
<i>Figura 5.51 Medición de la discontinuidad (Paso 4)</i>	<i>113</i>
<i>Figura 5.52 Medición de la discontinuidad (Paso 5)</i>	<i>113</i>
<i>Figura 5.53 Rueda con plano e imagen obtenida con palpadores EMAT.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 5.54 Rueda con pequeñas coqueras e imagen obtenida con palpadores EMAT.....</i>	<i>114</i>

Figura 5.55 Rueda con la banda de rodadura marcada por golpes e imagen obtenida con palpadores EMAT.....114

Figura 5.56 Informe de rueda derecha, 5º eje Civia nº 17.....115

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 3

<i>Tabla 3.1 Composición química y propiedades mecánicas de las ruedas según la calidad de la misma (ficha UIC 812-3, 1984).....</i>	<i>16</i>
--	-----------

CAPÍTULO 5

<i>Tabla 5.1 Efecto piezoeléctrico del cuarzo.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 5.2 Informe resumen de ultrasonidos realizado por CAF de unidades Civia de Madrid. El dato marcado en amarillo se corresponde con la información de la figura 5.54.....</i>	<i>116</i>



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La acumulación de daño por fatiga, deformación plástica y desgaste, reduce de manera significativa la vida en servicio del material ferroviario. En la actualidad, los aumentos tanto de velocidad como de carga por eje conducen a tensiones elevadas en el contacto rueda-carril. Esta evolución conduce a cambiar el principal daño existente en la llanta de la rueda, de desgaste a fatiga.

Uno de los elementos críticos del material ferroviario es la rueda, debido a que entre las funciones más destacadas se encuentran: transmisión de los esfuerzos tractores y de frenada al carril además del guiado del vehículo.

La fatiga puede causar fracturas graves en las ruedas o pérdidas de material en la superficie de la banda de rodadura. Estos fallos pueden provocar daños en raíles, en suspensiones de trenes y, aunque no ocurre con frecuencia, pueden conducir al propio descarrilamiento del tren.

Por tanto la existencia de un riguroso plan de mantenimiento en ruedas ferroviarias es de gran importancia para la seguridad de los trenes además del control de las fisuras existentes debido a la fatiga.

En este plan de mantenimiento el estudio de los ensayos no destructivos que se pueden llevar a cabo resulta de vital importancia, ya que son la mejor manera de detectar los problemas en las ruedas.

Sin embargo, no existe ninguna normativa ni procedimiento respecto al control de las fisuras, dependen exclusivamente de cada entidad ferroviaria o empresa de mantenimiento, basándose en la experiencia que se tiene, sin que exista un criterio único.

1.2 CONTENIDOS

El contenido del trabajo se divide en siete capítulos, el *primero* de los cuales se realiza la introducción y este resumen de contenidos

El *segundo capítulo* se detallan los objetivos más importantes perseguidos en este Trabajo Fin de Grado.

El *tercer capítulo* presenta una descripción completa de la rueda ferroviaria así como el proceso de fabricación además de todo lo relacionado con los tipos de daño que se pueden llegar a producir.

El *cuarto capítulo* describe la mecánica de la fractura asociada a las ruedas ferroviarias en particular, ya que se necesita un conocimiento previo de las teorías existentes para comprender los ensayos a realizar.

El *quinto capítulo* es el cuerpo principal del trabajo, en él se estudian los distintos ensayos no destructivos del mundo ferroviario, además se analizarán dos casos reales, uno mediante vibraciones y otro mediante ultrasonidos, por lo que se incluirá una visión práctica y real de los ensayos.

El *sexto capítulo* se realizará una breve conclusión del trabajo en el que se destacarán los aspectos más importantes y los posibles trabajos futuros a realizar.

El *séptimo capítulo* incluye las referencias y la bibliografía utilizada.



CAPÍTULO 2: OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO

2.1 OBJETIVOS

Este trabajo se ha centrado en el estudio de los distintos métodos de ensayos no destructivos que la industria ferroviaria aplica a las ruedas de los trenes.

- El principal objetivo es caracterizar estos ensayos no destructivos, describiendo ejemplos actuales que las distintas empresas ferroviarias están realizando, además de conocer las ventajas y limitaciones que estos ensayos tienen. De esta manera se pretende llegar a conocer la mayoría de las propuestas posibles para la inspección de ruedas y analizar cuál de ellas es mejor.
- Otro de los objetivos es analizar las investigaciones y desarrollos que se realizan para conseguir métodos más fiables y seguros de inspección.
- Finalmente el trabajo se centrará en el método más usado actualmente, como es el de ultrasonidos, de este se presentará los principios básicos de ultrasonidos, así como ejemplos reales de la industria ferroviaria de manera que se analizará una rueda específica de un tren observando si éste método es fiable y seguro.

Para la consecución de estos objetivos se llevará a cabo lo siguiente:

- Se ilustrarán una serie de puntos que resultan claves para el conocimiento de los ensayos, tales como el proceso de fabricación de la rueda o la clasificación de las fisuras en función de los tipos de daño.
- Se analizarán los avances en materia de vibraciones, en especial la desarrollada por la Universidad de Cataluña de análisis mediante vibraciones del plano de una rueda ferroviaria.
- Se estudiará un caso real de análisis por ultrasonido, de la empresa CAF para Renfe de un vehículo Civia.



CAPÍTULO 3: LA RUEDA FERROVIARIA

3.1 INTRODUCCIÓN

El modo de desplazamiento de los ferrocarriles es en su mayoría el de rueda enteriza de acero rodando sobre un carril de acero, con excepción de diversos casos como son los trenes de levitación magnética y los trenes que utilizan ruedas neumáticas.

La misión de las ruedas de tren es la de sustentar, guiar y transmitir al carril los esfuerzos para lograr circular en curva, acelerar y frenar. Cada una de estas funciones induce esfuerzos mecánicos y térmicos en las ruedas.

El mantenimiento y diagnóstico de los posibles daños de la rueda resulta primordial para la seguridad del tren, ya que la aparición de fisuras y grietas puede ocasionar el descarrilamiento del tren.

3.2 PARTES DE UNA RUEDA

Las partes fundamentales de una rueda se muestran en la figura 3.1 [1]:

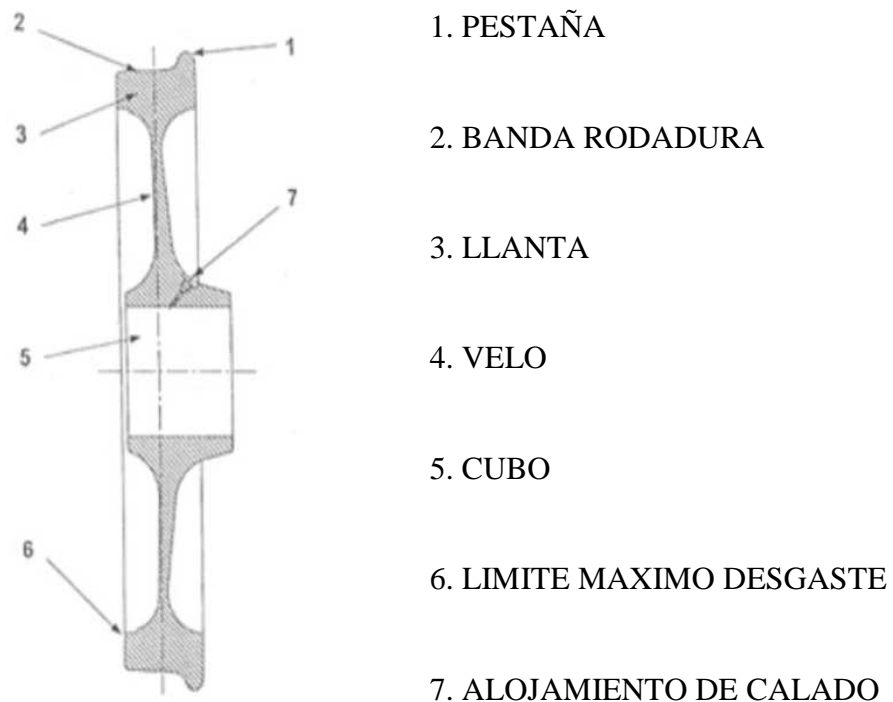


Figura 3.1 Partes de una rueda

- **Pestaña:** Aro saliente en el borde de la llanta de un vehículo ferroviario, destinado a impedir el descarrilamiento.

- **Banda rodadura:** Superficie de contacto entre llanta y carril.
- **Llanta:** Corona circular metálica que calada sobre el núcleo, constituye la superficie de rodadura de la rueda sobre el carril.
- **Velo:** Corona circular metálica que une la llanta al cubo de la rueda.
- **Cubo:** Elemento mecánico que establece la unión de la rueda y el eje.
- **Límite máximo de desgaste:** Es el límite hasta el cual se puede reperfilarse una rueda en condiciones de seguridad.
- **Alojamiento de calado:** es el dispositivo mediante el cual se introduce aceite a presión para el calado de la rueda y el eje.

3.3 TIPOS DE RUEDA

Los diferentes tipos de rueda vienen dados por cómo se une la llanta al velo [2].

- **Rueda monobloque:** La llanta y el velo se unen a través de un radio de acuerdo, perteneciendo la llanta y el velo a la misma unidad (ver Figura 3.2).

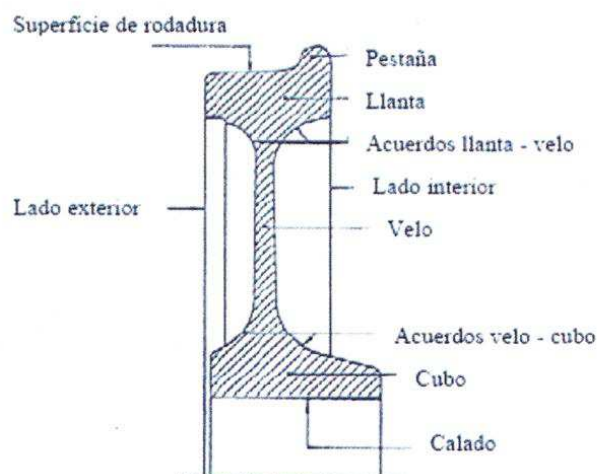


Figura 3.2 Rueda monobloque

- **Centro y bandaje:** La llanta se une al velo a través de un aro metálico denominado cincho, con calado en caliente. En este caso es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo (ver figura 3.3).

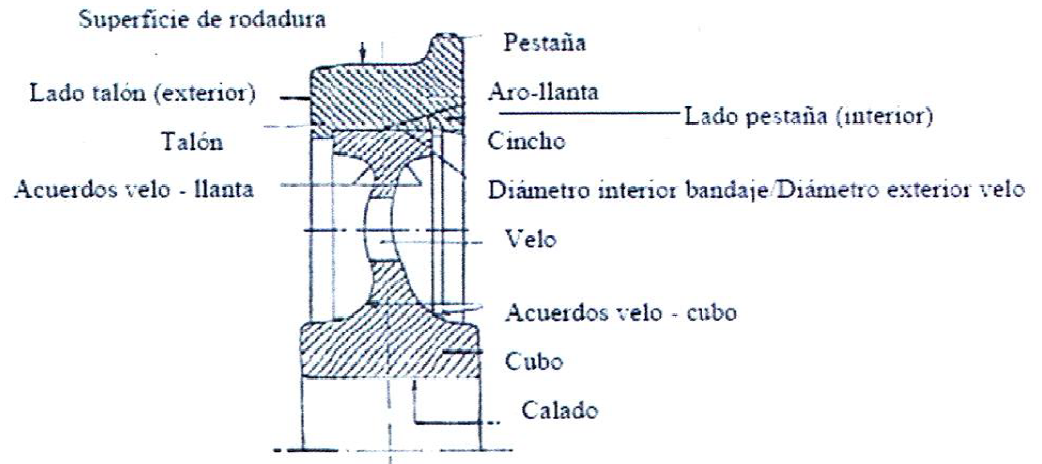


Figura 3.3 Rueda con centro y bandaje

- **Rueda elástica:** La llanta se une al velo a través de una banda de goma. En este caso también es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo (ver figura 3.4). La banda elástica amortigua ruidos y vibraciones y es muy usada en las ruedas de los tranvías y metros ligeros.

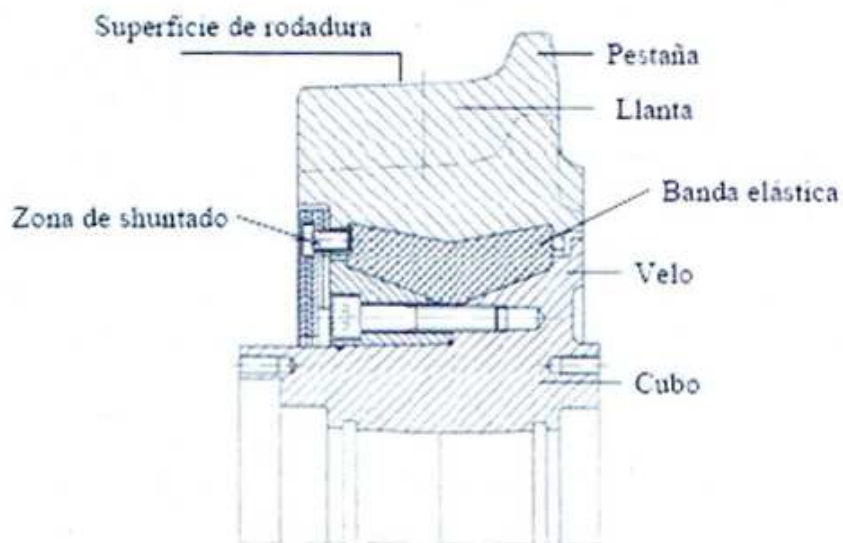


Figura 3.4 Rueda elástica

3.4 PARÁMETROS A CONTROLAR

Existen ciertos parámetros críticos dentro de una rueda ferroviaria que han de ser controlados y medidos con exactitud, ya que si alguno se saliese fuera de los límites establecidos sería motivo de reperfilado o sustitución [3].

- **Espesor de la pestaña (S_d):** El espesor de pestaña, es la distancia horizontal existente entre la cara interior de la rueda y el punto de intersección con el contorno de la pestaña, situado a 10 mm por encima del diámetro de rodadura (D) (ver Figura 3.5).
- **Altura de pestaña (S_h):** La altura de pestaña, es la distancia vertical entre el diámetro de rodadura (D), y una línea tangente al punto superior de la pestaña (ver Figura 3.5).
- **Cota “qR”:** El termino cota “qR” se emplea para definir la distancia horizontal existente entre dos puntos que interfieren con la pestaña, el primer punto es el punto (A), situado a 10 mm por encima del diámetro de rodadura (D), y el segundo punto (B) situado a 2 mm por debajo de una línea tangente a la cara superior de la pestaña (ver Figura 3.5).
- **Diámetro de rodadura (D):** El diámetro de rodadura, es la distancia existente entre dos puntos diametralmente opuestos, que interseccionan con la banda de rodadura y que están situados en un plano paralelo a la cara interior de la rueda, a una distancia de 70 mm desde ella (ver Figura 3.5).

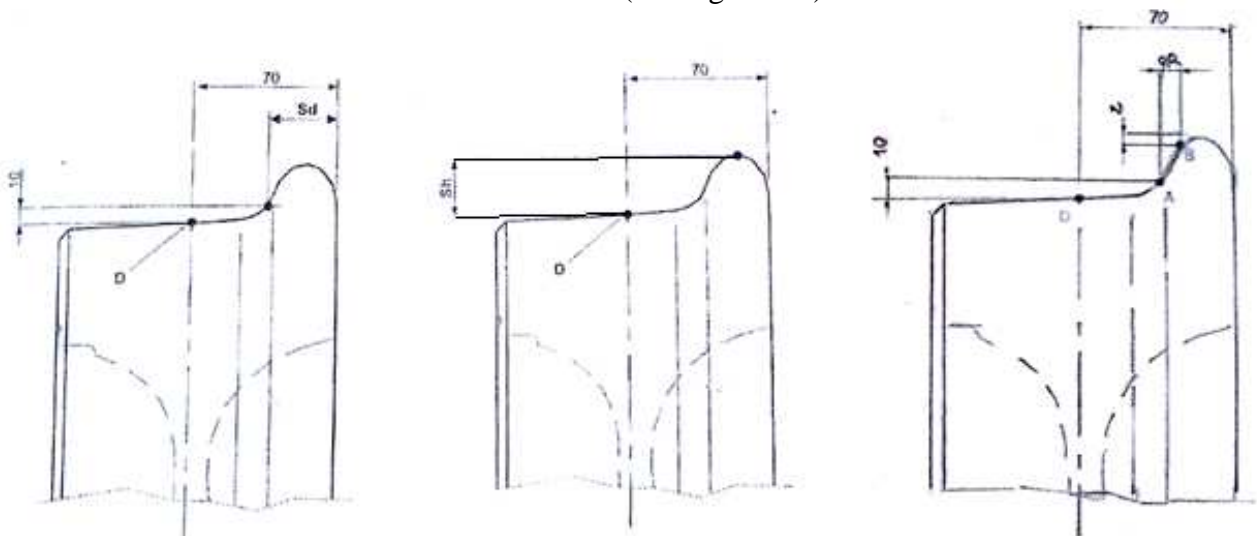


Figura 3.5 Parámetros a controlar

- **Ovalamiento:** El valor del ovalamiento queda determinado por la diferencia existente entre el diámetro mayor y menor, extraídos de la medición del diámetro de rodadura de una misma rueda en tres puntos distintos distantes entre sí 120° (ver Figura 3.6).

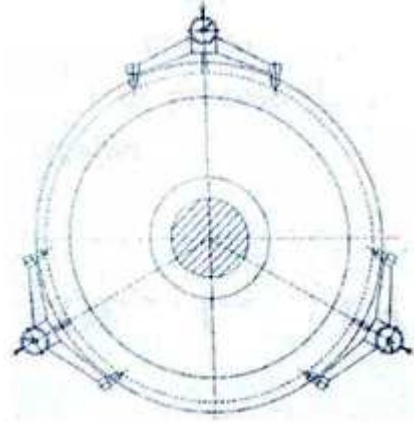


Figura 3.6 Ovalamiento

- **Distancia entre caras internas:** Es la distancia horizontal existente entre las caras internas de un mismo eje (ver Figura 3.7).

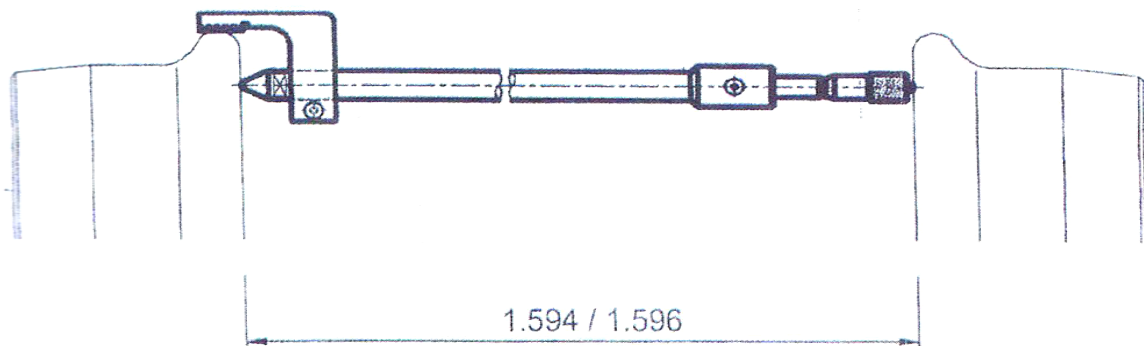


Figura 3.7 Distancia entre caras internas

- Diferencia de diámetro entre ruedas de un mismo eje.
- Diferencia de diámetro entre ruedas del mismo bogie.
- Diferencia de diámetro en ruedas motrices de un mismo coche.

3.5 FABRICACIÓN DE RUEDAS

Las ruedas de acero se pueden construir mediante dos procesos: forja o colada. El procedimiento usado en Europa es la forja, mientras que en Estados Unidos es más usada la colada.

Posteriormente, a la llanta se la somete a un proceso de temple y revenido dejando el velo y el cubo en estado normalizado.

Se explica a continuación, de forma resumida, las operaciones necesarias para la obtención final de la rueda en el caso europeo, es decir para una rueda forjada. En primer lugar nos centraremos en el proceso de forjado y laminado para después comentar el tratamiento térmico realizado [4].

La fabricación de ruedas es un proceso crítico pues es donde las inclusiones y defectos se originan, estos pueden derivar en problemas catastróficos.

3.5.1 Proceso de forjado y laminado

La secuencia de pasos es la siguiente:

1. El material de partida son bloques cortados a partir de lingotes o barras de material continuo, con unas tolerancias en peso muy cerradas, las cuales son calentadas hasta la temperatura de forja en un horno de hogar rotatorio. Los bloques calentados se transportan fuera del horno, se les somete a agua a alta presión para limpiar impurezas, se pesan y entonces es forjado en 2 operaciones, pasando a llamarse rueda en blanco (ver Figura 3.8)



Figura 3.8 Preforma en blanco con presa

2. Después de la limpieza mencionada, un manipulador coloca el bloque en la primera estación aplicando la presión. El bloque es centrado con el eje de la herramienta por el dispositivo de centrado que está integrado dentro de la prensa, el desarrollo del material es el mismo en las subsiguientes operaciones de prensado.

3. Después de finalizar el prensado, la rueda en blanco es sometida a operaciones que le proporcionan el perfil requerido. Este trabajo de reperfilar la rueda es efectuado en diferentes pasos utilizando los distintos rodillos que forman la máquina. Se consigue espesor óptimo, se da forma a la banda de rodadura, el acodamiento y el contorno interior, y por último se consigue la altura de la llanta necesaria (ver Figura 3.9).

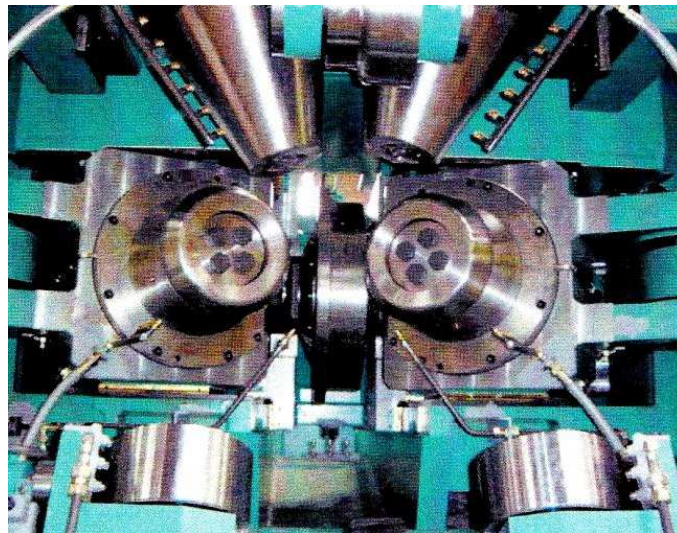


Figura 3.9 Colocación de las herramientas para conseguir el perfil de rueda requerido

Debido a la posición vertical de las ruedas durante el conformado por rodillos, los defectos superficiales se evitan en gran medida. Según la dirección de conformado de la rueda, con este procedimiento se generan tensiones de compresión en la rueda. Este hecho tiene una influencia favorable en las propiedades del material así como en la exactitud en las medidas de la misma.

La distancia entre los rodillos y por tanto el espesor, es controlado durante el proceso de conformado según se produce el crecimiento de diámetro de la rueda. La altura de la llanta se consigue en el último paso de conformado por ajuste de los dos rodillos laterales (ver Figura 3.10).

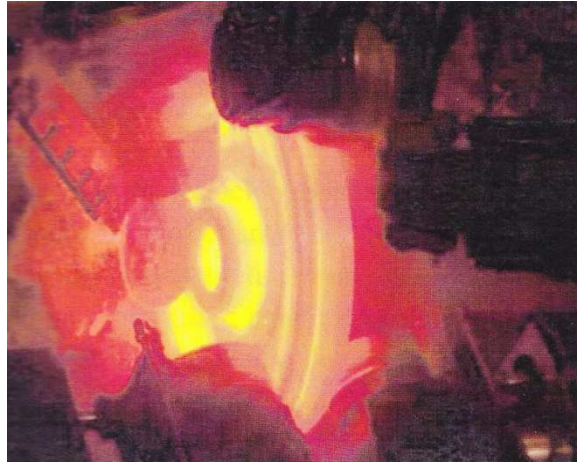


Figura 3.10 Operación de conformado

Las fuerzas de conformado son generadas de manera hidráulica y transmitida a la rueda en blanco a través de diferentes herramientas. Mediante distintos dispositivos como válvulas, supervisada por regulación electrónica y control de lazo, se adaptan instantáneamente con mucha sensibilidad los movimientos y presiones de operación según los requerimientos del proceso de conformado.

4. Un manipulador toma todas las ruedas conformadas desde el dispositivo de descarga y las traslada hacia la parte inferior de la matriz de la prensa para la deformación del velo de la rueda (ver figura 3.11).



Figura 3.11 Rueda deformada en prensa

5. La siguiente operación es la perforación de la parte central de la rueda por medio de un cilindro penetrante que está amarrado al martinete de la prensa. Durante la retirada de dicho cilindro una vez ha hecho la operación, se debe amarrar la pieza. Simultáneamente a la retirada del martinete, la rueda prensada y taladrada se separa de la prensa por medio de un elevador. Un manipulador se encarga de trasladar la rueda desde la prensa de deformación hasta la máquina de marcado.
6. Todo el proceso está controlado por dispositivos de medida láseres que se encargan del control dimensional de la rueda. Para explorar todas las partes de la rueda, este sistema se instala en una mesa rotatoria de 360°, de forma que los operarios tienen un soporte óptimo para hacer correcciones en la línea de producción y así evitar la producción de ruedas no válidas. Después del análisis de las medidas, un manipulador coge la rueda para un nuevo transporte hacia las instalaciones de tratamiento térmico.



Figura 3.12 Carga de las ruedas acabadas en una línea de transporte

3.5.2 Tratamiento térmico

El tratamiento de temple al que se somete la llanta consiste en calentar la rueda en un horno hasta los 827°C para eliminar las tensiones generadas en el forjado. Posteriormente la llanta se enfría con agua pulverizada durante unos segundos. Como la primera temperatura está por encima de la temperatura de transformación de fase se

produce la transformación de austenita a perlita durante el enfriamiento. La microestructura perlítica es la que da a la llanta su alta dureza.

En este punto la llanta se enfría y se contrae, mientras que el cubo y el velo siguen calientes y relativamente más blandos. La rueda se deja enfriar al aire durante aproximadamente 4 minutos para dejarla posteriormente en un horno a una temperatura de 480°C durante dos horas para aliviar algunas de las tensiones generadas durante el enfriamiento de la llanta. Durante este periodo el velo y el cubo se enfrían por debajo del punto de transformación y se contraen tirando de la llanta, que está más rígida. Este fenómeno introduce tensiones residuales de compresión en la llanta. Finalmente la rueda se deja enfriar a temperatura ambiente durante aproximadamente 6 h.

El resultado es que la parte inferior de la llanta y el velo quedan sometidos a tracción mientras que el resto de la llanta queda a compresión. Este estado de tensiones residuales a compresión impide la formación y crecimiento de fisuras, reduciendo el riesgo de falla en servicio. El campo de tensiones residuales a compresión se crea hasta una profundidad de alrededor de 40 mm desde la banda de rodadura. A medida que la rueda se desgasta es reperfilada, la capa de tensiones a compresión desaparece y la superficie de rodadura se acerca a la capa de tensiones a tracción.

En Europa las rueda se suministra según la ficha UIC 812-3 (5ª Edición-Enero 1984) “Especificaciones técnicas para el suministro de rueda monobloque de acero no aleado laminado para el material rodante motor y remolcado”, en 8 posibles calidades (R1 a R8) cuyas características se indican en la tabla 3.1 [5].

Calidad	Composición química (% máximo en peso)											Propiedades mecánicas		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	1+2+3	R _m (N/mm ²)	A(%)	KU (J)
R1	0,48	0,50	0,90	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	600-720	12-18	15
R2	0,58	0,50	0,90	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	700-840	9-14	10
R3	0,70	0,50	0,90	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	800-940	7-10	10
R6	0,48	0,40	0,75	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	780-900	15	15
R7	0,52	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	820-940	14	15
R8	0,56	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	860-980	13	15
R9	0,60	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	900-1050	12	10

Tabla 3.1 Composición química y propiedades mecánicas de las ruedas según la calidad de la misma (ficha UIC 812-3, 1984)

3.6 ESFUERZOS QUE SOPORTAN LAS RUEDAS

Los grandes esfuerzos a los que están sometidas las ruedas se deben a las cargas por rueda y a las fuerzas de guiado. La banda de rodadura es la parte de la rueda que más esfuerzos soporta, apareciendo en la banda de rodadura de las ruedas motrices y de las ruedas sobre las que se aplican los frenos, deslizamientos y altas cargas térmicas.

Los esfuerzos a los que está sometida la rueda pueden clasificarse desde el punto de vista del tiempo transcurrido en el que se manifiestan o también desde el origen de dichos esfuerzos [2]. Desde el punto de vista del espacio de tiempo en el que se manifiestan, los esfuerzos se clasifican en:

- **Esfuerzos constantes o de variación lenta en el tiempo.** Las tensiones residuales de fabricación, las tensiones de calado de ruedas y eje, y las tensiones permanentes desarrolladas tras una frenada de larga duración.
- **Esfuerzos que se manifiestan de forma intermitente.** Las tensiones debidas a gradientes térmicos.
- **Esfuerzos cíclicos.** Se manifiestan en la zona elastoplástica de contacto entre rueda y carril y son las tensiones ligadas a la rodadura. Se deben a la carga, al esfuerzo de tracción y pseudodeslizamiento. Aunque las cargas no sean muy elevadas, se pueden producir en la zona de contacto rueda-carril deformaciones plásticas en la llanta. Durante los primeros ciclos de carga se introducen en la rueda tensiones residuales, que junto a las deformaciones existentes, producen un endurecimiento del material.

La otra clasificación de los esfuerzos desde el punto de vista de su origen es:

- **Esfuerzos térmicos.** Las frenadas y los esfuerzos motores o retardadores cuando se produce patinaje debido a la pérdida de adherencia entre la rueda y el carril, provocan la aparición de dichos esfuerzos, que afectan sobre todo a la zona de la banda de rodadura, pudiendo llegar a producir transformaciones metalúrgicas en el acero (templado de las zonas que han patinado). Fuertes frenadas pueden crear tensiones que exceden en ciertas zonas el límite elástico

del material, provocando modificaciones en el campo de tensiones residuales, favoreciendo de esta manera la evolución de fisuras en zonas profundas.

- **Esfuerzos mecánicos.** La existencia de un esfuerzo vertical aplicado sobre la banda de rodadura en el contacto rodante y un esfuerzo lateral sobre la pestaña debidos a la carga por rueda y al guiado sobre la vía, provocan la aparición de esfuerzos mecánicos.

Los esfuerzos dependen del diseño del *bogie*, del diámetro y tipo de rueda, carga por eje, valor de la masa no suspendida, suspensión y de los sistemas de guiado y frenado. También dependen de las condiciones de utilización, como puede ser la velocidad, carga y tipo de trenes, y de las condiciones de acoplamiento entre la rueda y el carril o sus perfiles. Además los esfuerzos también dependen de defectos existentes en las ruedas, como defectos de fabricación, ovalización, diferencia de diámetros entre ruedas de un mismo eje, entre otros.

3.7 TIPOS DE DAÑO EN RUEDA

Los esfuerzos citados anteriormente provocan daños en el material de la rueda, que en algunas ocasiones pueden ser muy peligrosos para la seguridad ferroviaria [6]. Los principales tipos de daño en ruedas se agrupan en:

3.7.1 Desgaste

El daño desarrollado está asociado con un mecanismo de desgaste que causa cambios en el perfil de la rueda.

3.7.1.1 Desgaste en la banda de rodadura

“HollowWear” (HW) es el término dado para el desgaste existente en el centro de la banda de rodadura. Este efecto de desgaste concentrado a menudo se produce debido al uso de *bogies* de marcha muy estables que circulan predominantemente por rutas muy rectas. La interacción de las zapatas de frenado con la banda de rodadura puede,

dependiendo de su configuración y la selección del material, acelerar el desarrollo de este tipo de desgaste (ver figura 3.13).

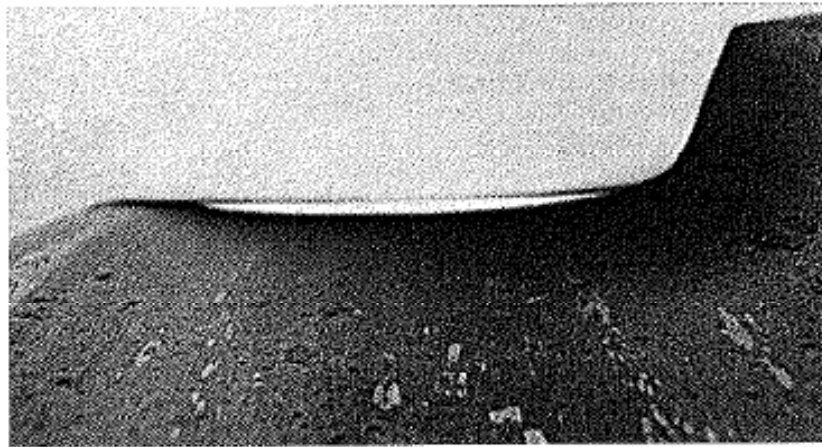


Figura 3.13 “HollowWear”

El desarrollo de este desgaste afecta a la conicidad efectiva del eje montado. Si el desgaste aumenta, puede en ciertos casos afectar a la dinámica y a los límites de estabilidad del vehículo.

Si este tipo de desgaste es muy significativo en el centro de la banda de rodadura, puede causar el desarrollo de la llamada “falsa pestaña”. No sólo puede afectar el desarrollo de una falsa pestaña en la dinámica del vehículo, sino también no conviene que ocurra, ya que puede ocasionar daños importantes tanto en la cabeza del carril como en los cambios y cruces de vía.

El desgaste durante los primeros kilómetros de vida de la rueda es uniforme en toda la banda de rodadura, cambiando después y repartiéndose más en dos zonas, cerca de la pestaña y en el extremo opuesto a la misma. Este desgaste se debe principalmente a las fuerzas de arrastre que actúan en la banda de rodadura cuando la rueda opuesta está con la pestaña haciendo contacto en el carril.

Las características de rueda y carril en la zona de contacto son casi imagen la una de la otra, así las tensiones máximas a cortadura en la rueda y en el carril serán similares.

El desgaste de rueda y carril depende de la dureza de sus materiales y es, en general, bastante lento, alrededor de 1.5 a 3 mm de media cada 100.000 km [17]. El

aumento de la velocidad de los trenes ha producido un aumento del desgaste y de las tensiones.

3.7.1.2 Desgaste de la pestaña

El desgaste de la pestaña afecta tanto a la cara de la pestaña como a la parte posterior de la misma. Se trata de fisuras de progresión axial que pueden afectar a una o varias zonas de la pestaña.

Este tipo de fisuras pueden tener origen térmico o mecánico. Si es origen térmico la aparición de dichas fisuras se debe a una fricción severa de la zapata de freno sobre la pestaña, por el uso de zapatas de geometría inadecuada. En el caso de ser fisuras de origen mecánico, las fisuras se producen por presiones anormales entre pestaña y carril debidas a trazados de vía deficientes (ver Figura 3.14).

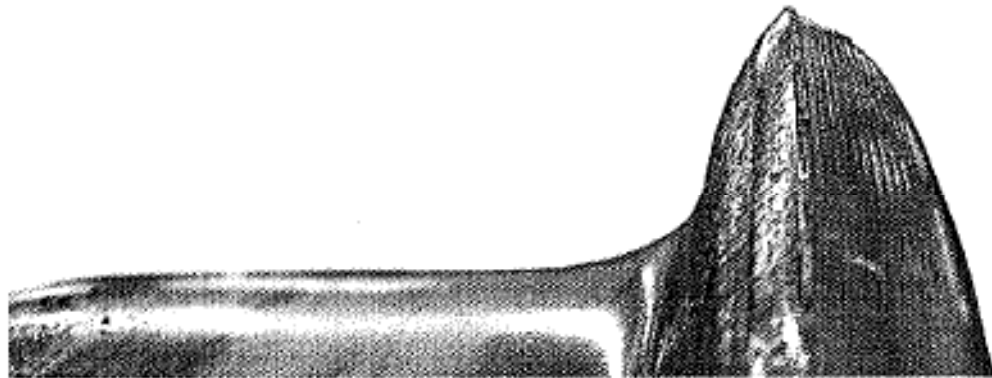


Figura 3.14. Desgaste moderado en la cara de la pestaña

El desgaste de la cara de la pestaña está típicamente influenciado por la curvatura de la ruta seguida, la infraestructura, características del *bogie*.

También se sabe que los desgastes elevados de la cara de la pestaña están causados por unas secciones con juegos muy limitados, es decir, muy ajustados. En casos donde se produce un desgaste intenso de la cara, se puede observar un desgaste menor en la vía por la que circulan dichas ruedas.

Si hay una diferencia notable en el desgaste de la pestaña entre los lados diferentes de un vehículo, normalmente indica la existencia de un perfil. Un desgaste asimétrico diagonalmente del *bogie* puede indicar también ser resultado de una puesta en marcha incorrecta del vehículo.

El desgaste en la pestaña es más severo durante los primeros 500 km, mientras que después se reduce. Este mayor desgaste inicial se debe al hecho de que el perfil nuevo contacta con el carril en una pequeña zona, soportando elevados valores de presión y, por lo tanto, con una alta fricción.

3.7.2 Fatiga

El fenómeno de fatiga podría definirse como la acumulación de daño generado por la aplicación sucesiva de cargas de carácter cíclico.

3.7.2.1 “Rolling Contact Fatigue”

RCF es el término dado al daño relativo de fatiga, inducido por la acción repetida de una fuerza de arrastre resultante, además de las fuerzas verticales de contacto rueda-carril actuando sobre el mismo área de la rueda.

Los ciclos repetidos de carga y descarga sobre la banda de rodadura de la rueda junto con las fuerzas de deslizamiento adicionales, conducen a través del proceso conocido como “ratcheting”, a una deformación plástica del material.

Una vez se supera la ductilidad del material por el incremento de deformación plástica, las fisuras empezarán a iniciarse y a propagarse por estar sometidas a ciclos de carga repetidos en el material, en dirección paralela al plano de deformación del material. Una vez las fisuras han alcanzado cierto tamaño, también se propagarán debido a la presión hidrostática aplicada por algunos fluidos que entran en las fisuras desde la banda de rodadura o por la cabeza del carril y quedan atrapados por la rotación de la rueda a lo largo del carril.

En ciertas ocasiones las redes de fisuras se pueden haber desarrollado lo suficiente para que ocurra el fenómeno de “shelling”, término utilizado para el proceso de pérdida de material desde la banda de rodadura, siguiente al establecimiento de una red de fisuras por fatiga.

Como las fisuras se propagan además dentro de la banda de rodadura su alineación cambiará lentamente desde su ángulo tangencial inicial y empieza a adoptar una alineación más radial.

Debido a la diferencia longitudinal y a las fuerzas laterales presentes dentro de varias zonas de la banda de rodadura de la rueda, se obtienen cuatro clasificaciones de RCF dependientes de la localización; la *zona 1* para la banda de rodadura, *zona 2* para interacción de la rueda en su zona más cercana a la pestaña con el carril exterior de la curva, *zona 3* para diámetros de ruedas dentro de un *bogie*, y la *zona 4* para el eje de la rueda (ver Figura 3.15).

Debido a la reacción igual y opuesta de las presiones de contacto y las fuerzas de deslizamiento involucradas, el daño por RCF afecta tanto a ruedas como a carril. Sin embargo, debido a la diferencia de orientaciones y de magnitudes de fuerzas resultantes, los efectos varían.

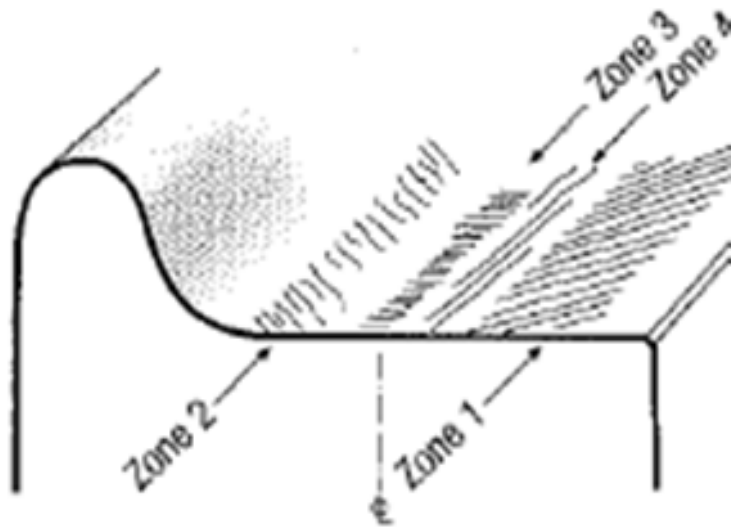


Figura 3.15 RCF. Localizaciones relativas a zonas de la rueda

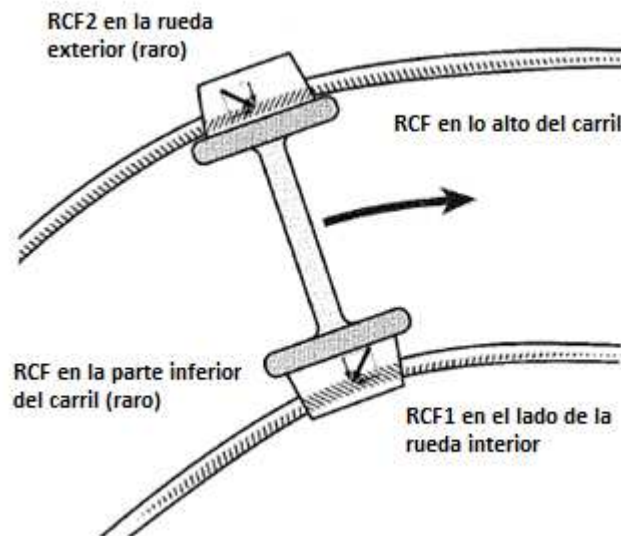


Figura 3.16. Desarrollo de RCF dentro de una curva

3.7.2.2 Fatiga subsuperficial

Esta forma de daño en rueda se da en pocos casos pero puede conducir a la pérdida de una sección de la llanta.

Las fisuras por fatiga subsuperficial normalmente se inician por la presencia de cuerpos extraños, escoria o pérdidas en la homogeneidad metalúrgica del material dentro de la llanta. Según la rueda se aproxima a su límite de desgaste, las tensiones dentro de la rueda se incrementan; esto junto con el incremento de la acumulación de cargas cíclicas influyen en que alguna pérdida de homogeneidad dentro del material puede convertirse en un punto de inicio de fisura por fatiga.

Con las mejoras en desarrollos de ruedas de acero sin impurezas, los procesos de inspección de ruedas por ultrasonidos y los regímenes de pulido de vías que controlan los raíles corrugados, los ejemplos de fisuras por fatiga subsuperficial son cada vez menores, pero la no utilización de aceros de alta calidad para ruedas ferroviarias provoca la existencia todavía de este tipo de daño debido sobre todo a las inclusiones.

Hasta que dichas fisuras no han llegado a la zona superficial de la banda de rodadura, las fisuras subsuperficiales sólo pueden ser detectadas en servicio usando una metodología de ensayo no destructiva volumétrica, como por ejemplo, ensayos por ultrasonidos. Aunque una vez que la fisura subsuperficial se ha propagado lo suficiente hasta alcanzar la superficie de la cara de la llanta o posiblemente la cara posterior de la pestaña, este tipo de fisuras pueden detectarse visualmente.

La consecuencia de la pérdida de un segmento de la banda de rodadura de la rueda debido al desarrollo completo de una fisura subsuperficial es peligrosa, ya que en ocasiones la pérdida del segmento puede incluir una sección de la pestaña lo cual puede incrementar de manera significativa el peligro por descarrilamiento cuando existen en el recorrido curvas cerradas, desvíos o cruces.



Figura 3.17 Fisura por fatiga subsuperficial que causa la pérdida de una sección de la pestaña así como de la banda de rodadura

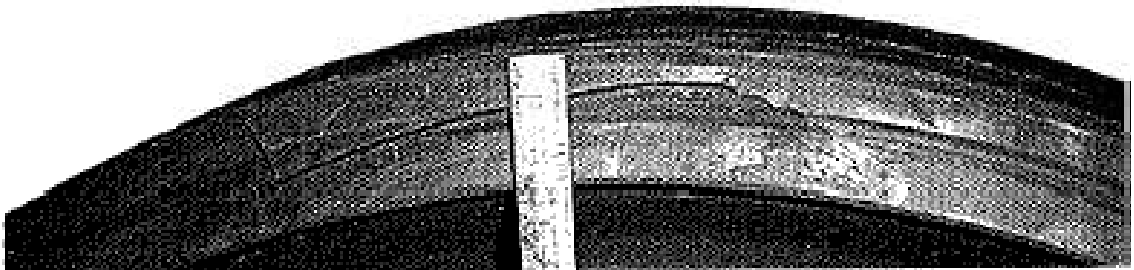


Figura 3.18 Fisura por fatiga subsuperficial que se ha propagado sobre la cara de la llanta

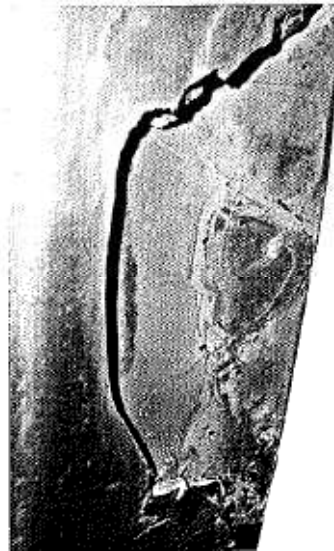


Figura 3.19 Pérdida de material en una zona de la banda de rodadura debido a una fisura subsuperficial

3.7.2.3 Defectos en el velo

Son fisuras circunferenciales que, partiendo de una zona defectuosa, se desarrollan por fatiga. Este tipo de fisuras pueden afectar a todo el espesor del velo y alcanzar grandes desarrollos circunferenciales, hasta producir la rotura brusca de la rueda. Estas zonas defectuosas pueden ser defectos metalúrgicos, pliegues de forja o laminación, etc., capaces de generar una fisura bajo los grandes esfuerzos alternativos a los que se ve sometido el velo. También pueden producirse por entallas de mecanizado o por un diseño incorrecto (partes delgadas, taladros de equilibrado, radios de acuerdo cerrados o zonas de rugosidad elevada).

Las tensiones en servicio, como son las producidas en curvas, producen en el velo un fenómeno de fatiga. Hasta que la rueda se ha desgastado a sus dimensiones mínimas aceptables, el número de ciclos de carga puede haber sido del orden de 10^9 . El momento más peligroso desde el punto de vista de la fatiga, es el paso a máxima velocidad por la curva de radio más pequeño.

La zona de transición entre la llanta y el velo es una zona peligrosa, donde el momento de flexión alternado causa fisuras de fatiga en el interior de las ruedas. Otra zona peligrosa es la zona del velo próximo al eje donde los valores de resistencia a fractura, son los más pequeños en toda la rueda.

El desarrollo de fisuras se asocia a las altas tensiones a tracción generadas tras frenadas prolongadas y bajo la acción de altas cargas verticales y laterales.

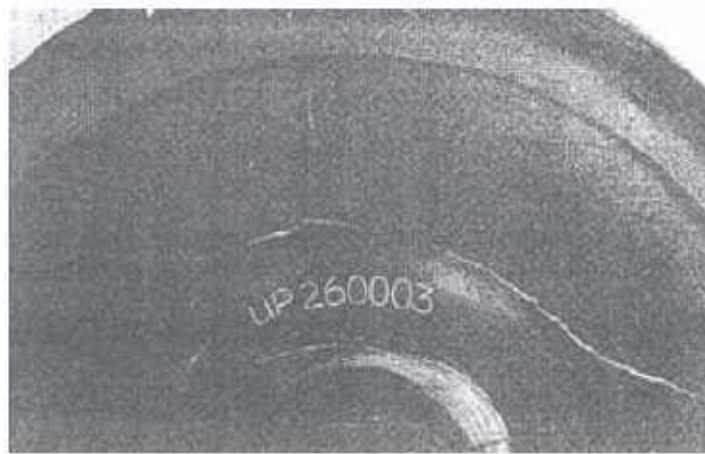


Figura 3.20 Fisura circunferencial desarrollada en el velo de una rueda

3.7.2.4 Defectos en el cubo

Generalmente se corresponden con fisuras de progresión axial producidas por defectos internos o aprietes excesivos durante la operación de calado. Este tipo de defecto no es muy común.

3.7.3 Deformación

Altas presiones de contacto, fuerzas de arrastre y/o materiales no homogéneos pueden provocar que se produzca la deformación del material, la cual se puede encontrar distribuida en toda la banda de rodadura o localizada en diversos puntos.

3.7.3.1 Deformación lateral en la barra de rodadura

Este tipo de daño por deformación lateral, provoca un labio desarrollado sobre la parte del chaflán en la banda de rodadura de la rueda.

La cantidad permisible de deformación lateral se establece normalmente en el manual de mantenimiento del vehículo. Hay variaciones en redes y vehículos donde está permitida cierta cantidad de deformación.

Típicamente las locomotoras sufren con más frecuencia este tipo de daño que otros tipos de vehículos de las redes principales. Esto se debe a que las locomotoras

junto con sus grandes ejes cargados, generalmente aplican fuerzas muy elevadas de tracción mientras circulan por curvas cerradas.

En ciertas ocasiones tras una deformación lateral de la llanta, en la zona de la banda de rodadura se pueden producir ahondamientos y también puede ser que el chaflán se desplace lateralmente debido a dicha deformación.

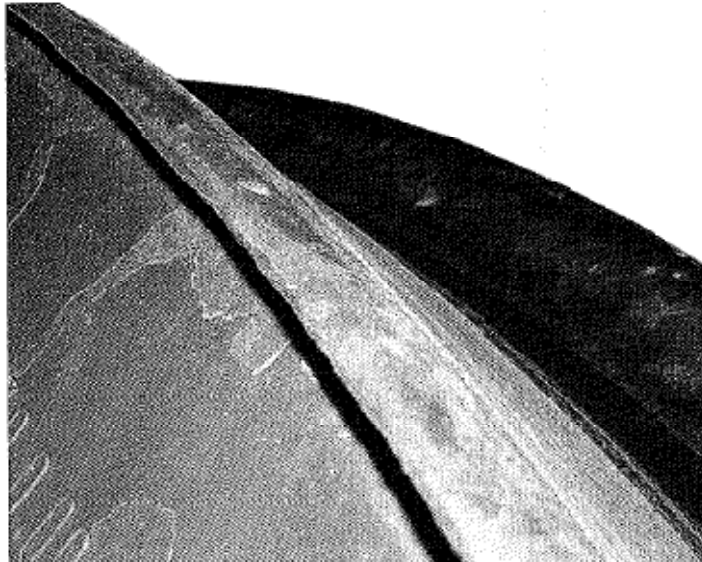


Figura 3.21 Deformación lateral en la barra de rodadura

3.7.3.2 Colapso local de la banda de rodadura

Este tipo de daño localizado puede conducir a deformaciones laterales y a pérdidas de circularidad en las ruedas. Se generan disminuciones en las medidas del radio de la rueda que pueden llegar al milímetro de longitud. La detección de este tipo de daño se consigue por la activación de una señal basada en sensores de carga en ruedas, que reflejan sobrecargas verticales transmitidas a la vía.

Esta categoría de daño tiene en común con el RCF, que aparece como un fenómeno único en ruedas individuales y puede ocurrir en ausencia de martensita u otros tipos de daño térmico. Después del daño por deformación plástica lateral, la red de fisuras puede entonces desarrollarse hacia el centro de la banda de rodadura, lo que puede conducir desprendimientos de material y la formación de cavidades locales en la rueda.

3.7.3.3 Planos de rueda

Los planos de rueda (Wheelflats) es posiblemente la forma más clásica de daño. Este fenómeno está causado después del bloqueo total o parcial de un *bogie* mientras el vehículo está todavía en marcha, produciéndose deslizamientos sobre el carril. Esto da origen a elevados niveles de deslizamiento (diferencia entre la velocidad de rotación de la circunferencia de la rueda y la velocidad lineal del vehículo) entre la rueda fija o casi fija y la vía.

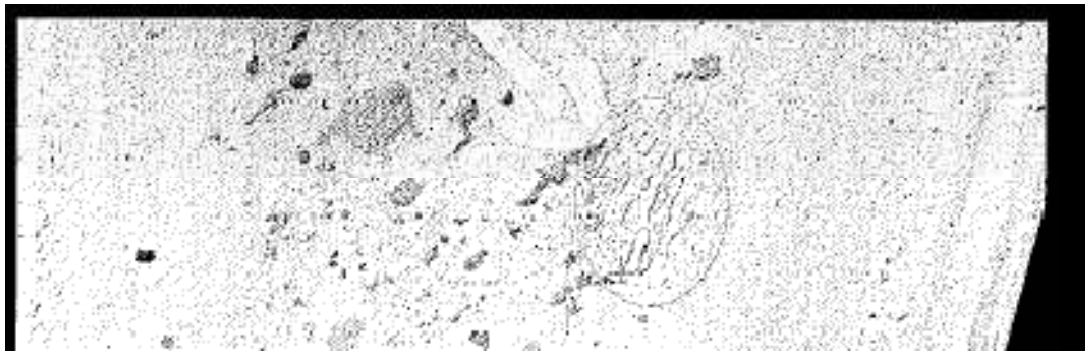


Figura 3.22. Vista cercana del plano en la rueda por donde las fisuras se han iniciado dentro de la zona afectada por el calor

Una idea equivocada y muy común, es que el daño por planos de ruedas se causa por la acción abrasiva de la rueda, por el deslizamiento de ésta a lo largo de la cabeza del carril. Sin embargo es el daño térmico resultante de la entrada significativa de calor por el deslizamiento, el que causa la mayoría del daño, aunque en ocasiones puede también llevarse a cabo una pequeña cantidad de abrasión mecánica, se ha incluido en el apartado de deformación porque una vez que se produce el calentamiento, el plano se produce por deformación de la banda de rodadura.

Por el deslizamiento de la rueda sobre el carril, la fricción resultante calienta localmente la parte de contacto con la rueda, la cual puede alcanzar temperaturas significativas (800° - 850°C), necesarias para transformar el material de la rueda de acero perlítico en austenita. Como la parte de contacto en la rueda se enfría rápidamente después que el deslizamiento ha cesado, especialmente una vez que la rueda empieza a girar de nuevo y entra otra vez en contacto con la cabeza fría del carril, la austenita se transforma en martensita debido a este enfriamiento rápido.

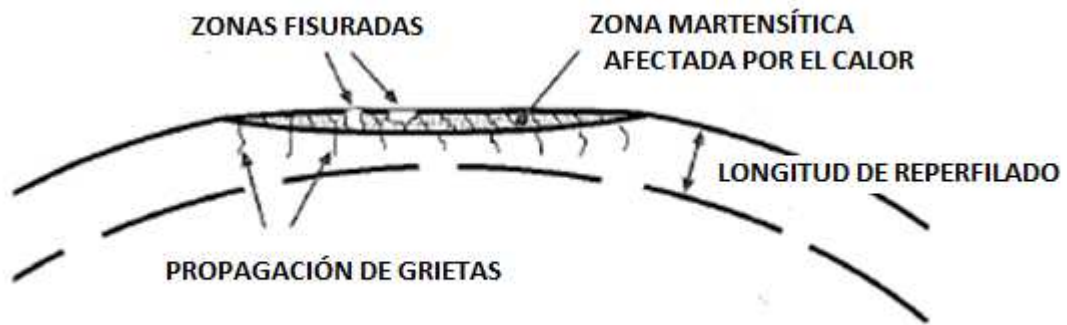


Figura 3.23 Representación esquemática de una sección de corte de un plano de rueda



Figura 3.24 Plano de rueda por el bloqueo del eje que ha comenzado a fisurarse superficialmente

Debido a la aplicación de ciclos adicionales de cargas mecánicas en el área de contacto, se desarrollan fisuras en la zona afectada por el calor. Éstas se propagan hasta que la zona de acero martensítico endurecida que ha sido afectada por el calor empieza a desprenderse dejando cavidades en la banda de rodadura. Estas cavidades producen cargas mecánicas por el golpeteo, y conducen a pérdidas radiales significativas asociadas con los planos de rueda. Ocasionalmente la red de fisuras puede propagarse por debajo de la zona afectada por el calor dentro del material que la rodea.

Los planos de ruedas pueden desaparecer con los reperfilados, aunque se debería tener en cuenta la profundidad del corte que es necesaria para eliminar todo el material

afectado por el calor y todas las redes de fisuras restantes situadas bajo la capa de martensita.



Figura 3.25 Plano de rueda



Figura 3.26 Plano de rueda con desprendimiento

3.7.3.4 Deformación de la punta de la pestaña

Irregularidades en los perfiles y cuerpos extraños junto con los raíles acanalados, pueden también dar origen al incremento de las presiones de contacto localizadas en el extremo de la pestaña, que causan deformación plástica en dicha pestaña. Se pueden desarrollar por las cargas repetidas, o por choques del extremo de la pestaña. Los reperfilados de la banda de rodadura de la rueda restauran la rueda y la condición de la pestaña, aunque se necesitan medidas adicionales para prevenir que se repita tal efecto.

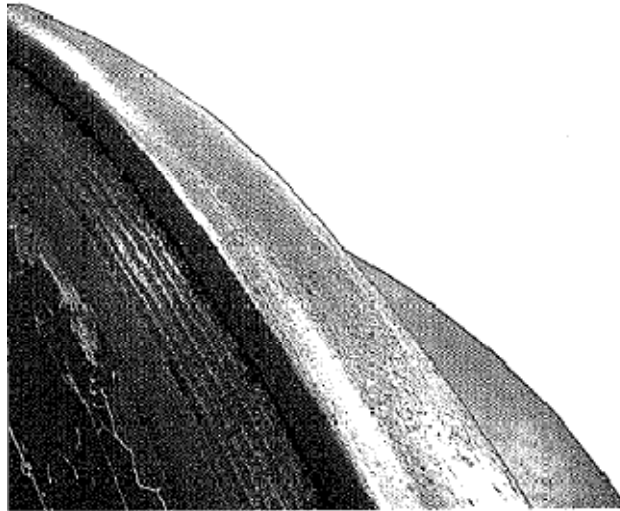


Figura 3.27 Pestaña con choques en su extremo

3.7.3.5 Desprendimiento en la pestaña

Típicamente se origina por la existencia de una elevada presión de contacto de la pestaña de la rueda en contacto con el carril, el cual tiene una parte cortante que interacciona con la pestaña. En principio esta parte cortante del carril debe estar a una altura que garantice la no interacción con la pestaña, pero por posibles desgastes tanto en la rueda como en la cabeza del carril, la parte cortante se aproxima a la pestaña. También se forma tras circular con la punta de la pestaña por vías acanaladas (especialmente tranvías en cruces y desvíos) con irregularidades localizadas o cuerpos extraños en las ranuras que causan un incremento de la presión de contacto en la base de la pestaña.

El reperfilado de la banda de rodadura de la rueda restaura la rueda y las condiciones de la pestaña aunque se deben tomar medidas adicionales para evitar que este tipo de daño se repita.

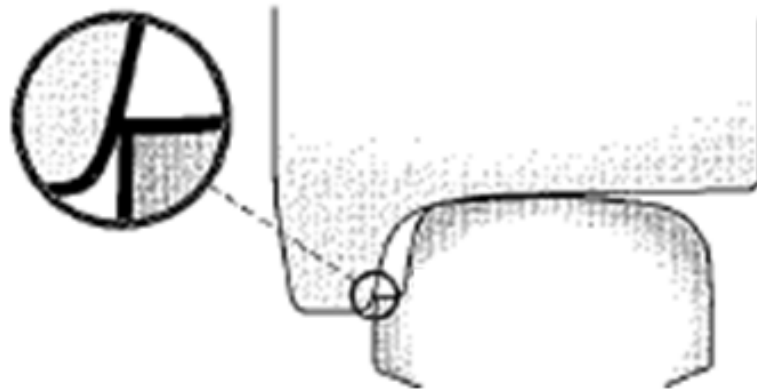


Figura 3.28 Representación esquemática de la interacción de la parte alta de la pestaña con un carril que tiene un nivel significativo de parte cortante

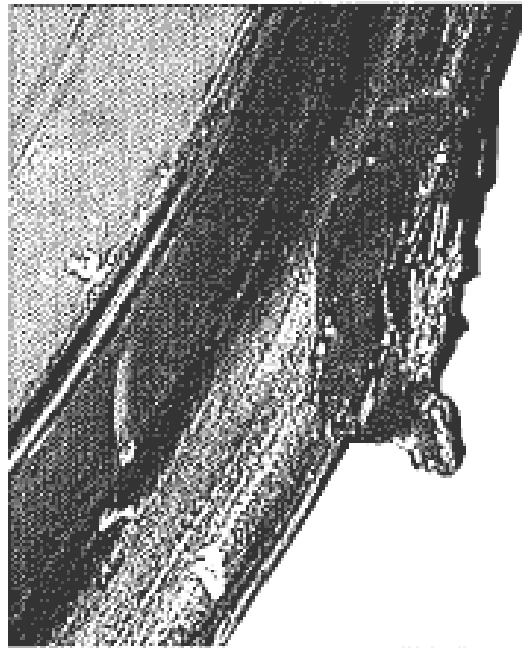


Figura 3.29 Desprendimiento de la pestaña

3.7.4 Térmico

Las cargas térmicas procedentes de frenadas, sea del deslizamiento de los ejes montados o el calor generado durante el bloqueo de las ruedas causan unos tipos de daños muy variados.

3.7.4.1 Sobrecarga térmica

En vehículos donde la banda de rodadura se usa para frenar el vehículo, existen niveles significativos de calor transferido desde la llanta hacia el interior de la rueda, como consecuencia de la conversión de energía cinética en energía térmica. El arrastre de las zapatas, frenadas prolongadas u otras acciones inapropiadas, afectan a la integridad de la banda de rodadura; una rueda puede calentarse más allá de su capacidad térmica para la que fue diseñada y por tanto sufrir una sobrecarga térmica.

Los efectos visuales de las sobrecargas térmicas son la decoloración de la pintura de la llanta y una decoloración del acero de la rueda en la banda de rodadura, por la cara de la llanta. Las consecuencias son el cambio de signo de las tensiones residuales de compresión existentes en la llanta y/o el inicio de fisuras laterales en la banda de rodadura si las temperaturas y duración del sobrecalentamiento son excesivas.



Figura 3.30 Rueda que ha sufrido una sobrecarga térmica

3.7.4.2 Fisuras térmicas laterales

Después de una sobrecarga térmica por la acción de frenado, se pueden desarrollar fisuras térmicas laterales en la banda de rodadura. La presencia de fisuras térmicas laterales es un factor relevante en la seguridad, ya que estas fisuras pueden propagarse lateral y radialmente a través de la llanta y hacia el velo de la rueda. En el caso extremo, puede producirse un fallo catastrófico por la aplicación de cargas mecánicas y térmicas posteriores a ese inicio de fisura. El desarrollo de fisuras térmicas laterales puede, pero no necesariamente, indicar que las tensiones residuales protectoras de la llanta han sido

neutralizadas o que han cambiado de signo como consecuencia del sobrecalentamiento anterior de la rueda.

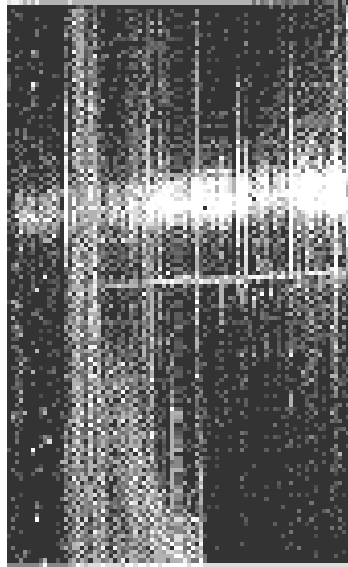


Figura 3.31 Fisura lateral térmica

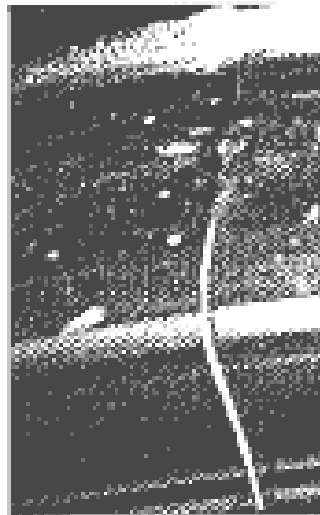


Figura 3.32 Llanta fisurada tras un sobrecalentamiento

El comienzo de las fisuras laterales térmicas no solo dependerá de la temperatura de la superficie de la banda de rodadura que se alcanza, sino también del gradiente térmico que existe en la llanta y del periodo de duración.

3.7.5 Infraestructura

El ferrocarril moderno es un sistema con una interacción clave entre rueda y carril. Por tanto hay un rango de daños que son dependientes de la infraestructura junto con el sistema crítico de la interacción rueda y carril.

3.7.5.1 Marcas en la banda de rodadura

Las hendiduras o marcas en la banda de rodadura se originan por la existencia de cuerpos extraños en la cabeza de la vía (ver Figura 3.33).

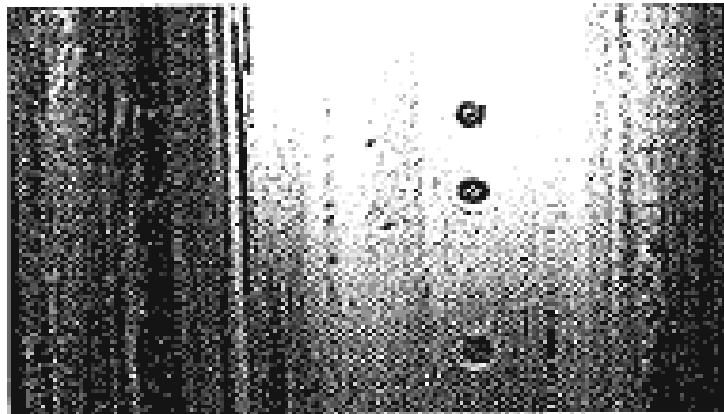


Figura 3.33 Marcas debidas a cuerpos extraños presentes en el carril

En la mayoría de los casos este tipo de daño afecta sólo a la apariencia de la rueda, aunque si se exceden los límites expuestos en el manual de mantenimiento, entonces las ruedas afectadas deben ser reperfiladas.

Partículas de arena desde los sistemas de arena de a bordo para mejorar la tracción o frenado pueden también crear estas marcas en la banda de rodadura. El tamaño de las marcas será por tanto proporcional al tamaño de grano de la arena usada en la respectiva red (ver Figura 3.34).



Figura 3.34 Marcas debidas a arena

3.8 MECANISMOS DE AGRIETAMIENTO EN RUEDA

Como se ha ido mencionando anteriormente, en la mayoría de los defectos que se producen están presentes las fisuras. Esas fisuras en las ruedas son importantes debido, básicamente, a tres factores: seguridad, confort y consumo de la llanta.

Las fisuras nacen de los defectos, y esos defectos pueden ser de dos tipos:

- a) Defectos producidos por la fabricación
- b) Defectos producidos durante el servicio y sujetos a observación en las labores de mantenimiento. Suelen ser fisuras de fatiga, defectos de corrosión o una mezcla de ambos.

Las fisuras crecen básicamente debido a la acción de los esfuerzos mecánicos (tensiones de cortadura), mientras que los esfuerzos térmicos juegan un papel importante en la nucleación de las mismas, en su crecimiento hasta alcanzar el valor umbral y en la generación de tensiones residuales.

Para conseguir un estricto control sobre las fisuras en ruedas ferroviarias se debe determinar:

1. Tipo de defectos que se pueden producir y su posición. Uno de los principales problemas que se plantean es detectar las posibles zonas de desarrollo de fisuras a partir de dichos defectos. La principal dificultad, es que en las ruedas existen

numerosas localizaciones en las que una fisura podría llegar a desarrollarse y además, dependen de muchos factores.

2. Modo de fallo esperado.

3. Vida útil a partir de la detección de una fisura.

4. Si el resultado del fallo será catastrófico o simplemente producirá pérdidas económicas (necesidad de reperfilar la rueda).

5. Tamaño de fisura crítico que produce rotura, dependiente de muchos factores. No existen normas que definan los tamaños mínimos admisibles. Hay algunas normativas que indican tamaño y posición de los defectos críticos para las ruedas nuevas (tras su fabricación). Existen numerosos estudios que tratan de calcular dicho tamaño de grieta crítico, pero al depender de tantas circunstancias, es difícil hacer una norma que sirva siempre.

6. El número de inspecciones a realizar a lo largo de la vida de la rueda. Las ruedas que son más propicias a la aparición de fisuras son aquellas que han sufrido un sobrecalentamiento como consecuencia de una frenada prolongada, debido a que las fuerzas de compresión residuales conseguidas tras el tratamiento térmico durante su fabricación se transforman en tensiones de tracción, que ayudan a la iniciación y propagación de las fisuras.

De todos los defectos detectados en las ruedas ferroviarias, se destacan las fisuras que pueden existir a distintas profundidades en la banda de rodadura, como son las superficiales, subsuperficiales y las internas.

3.8.1 Fisuras superficiales “Spalling”

Son fisuras que se propagan hacia el interior de la llanta, llegando a producir pequeños desprendimientos de material. Estas fisuras se producen por el deslizamiento de las ruedas o por la acumulación de deformación plástica en la superficie de rodadura.

- Producidas por deslizamiento de ruedas:

La fricción entre rueda y carril introduce una alta carga térmica local en la banda de rodadura, llegando hasta temperaturas próximas a los 800°C. A esta temperatura

disminuye el límite elástico en esa zona, pudiendo aparecer deformación plástica. Cuando la rueda vuelva a girar se produce un rápido enfriamiento, produciéndose una transformación de fase en la banda de rodadura, formándose martensita; lo que provoca que se produzcan tensiones residuales compresivas en la estructura martensítica y tensiones residuales de tracción en el material de alrededor. Si la rueda con planos sigue en servicio o si la zona afectada por el calor no se elimina por mecanizado, se formarán grietas de fatiga por la acción de las tensiones de contacto de rodadura. La resistencia a la propagación de fisuras en la martensita es prácticamente nula, sin embargo no es seguro que las fisuras continúen propagándose una vez entran en el material base. Se produce deformación superficial y se forman grietas en el área de contacto entre la pequeña capa de martensita y la zona que la rodea de perlita. Mientras la rueda se mueva se favorece el crecimiento de grietas.

Una vez que las fisuras crecen, se producen desprendimientos de pequeños trozos de material haciendo que continúe aumentando el nivel de impacto (ver Figura 3.35) [28].



Figura 3.35 Desprendimiento en la banda de rodadura producido por “Spalling”

- Producidas por deformación plástica en la superficie de la banda de rodadura (*rachetting*):

Cuando la carga está por encima del límite elástico de la rueda, se produce flujo plástico, produciéndose tensiones residuales y endureciéndose el material por deformación. El fallo ocurre por ciclo de fatiga de baja frecuencia, tratándose de un fenómeno que ocurre cerca de la superficie de rodadura y su principal causa son las altas fuerzas de fricción.

Cuando la ductibilidad de la superficie del material está agotada se desarrolla una grieta que suele orientarse perpendicularmente a la dirección de deslizamiento. La deformación produce fisuras que se inician en el material y se propagan a lo largo de los granos deformados plásticamente, propagándose inicialmente en la superficie con un ángulo poco profundo, para seguir una dirección axial. Por último suelen desviarse en dirección circunferencial, produciéndose la rotura final cuando una parte de la fisura llega a la superficie, desprendiéndose una parte de la banda de rodadura.

3.8.2 Exfoliaciones “Shelling”

La rotura de la banda de rodadura por fatiga, producida por el defecto conocido como “shelling”, es uno de los defectos de ruedas más comunes. Este defecto está asociado a altas cargas y bajos niveles de deslizamiento, produciéndose la pérdida de material causada por RCF. Durante el ciclo de contacto el daño subsuperficial se acumula dando lugar a pequeñas grietas horizontales. Bajo ciclos de carga estas grietas se propagan bajo la superficie hasta que el campo de tensiones hace que la grieta cambie de dirección hacia la superficie.

Se caracteriza por tener forma de anillo, paralelo a la superficie de rodadura. Se trata de defectos producidos por fatiga y crecimiento de grietas cerca de la banda de rodadura, a una profundidad de unos pocos milímetros, alrededor de unos 6 mm [29]. Se supone que las fisuras se inician a una profundidad de entre los 4 y los 5 mm [30], propagándose hasta una profundidad de unos 20 mm, desviándose a esta profundidad en una fisura circunferencial, observándose grietas de entre 15 y 30 mm antes de la rotura del material.

El proceso depende del material y de las condiciones de operación, pero en todos los casos se manifiesta por el inicio y propagación de fisuras en capas próximas a la superficie hasta formar desprendimientos que dan lugar a agujeros. El inicio de las grietas a fatiga se asocia con la deformación local cíclica y plástica. Una vez que las fisuras se forman, se propagan rápidamente, aparentemente paralelas a la superficie, a la profundidad de la mayor tensión de contacto de cortadura.

Este tipo de defecto puede ser muy peligroso ya que produce el desarrollo de fisuras que crecen circunferencialmente, pudiendo llegar a desprender secciones

importantes de material. Las malas condiciones del carril, cargas y velocidades excesivas, dureza de la rueda insuficiente, ruedas demasiado pequeñas para la carga a sostener, son factores que contribuyen a la formación de “shelling”, predominando este tipo de daño en ruedas frenadas por discos.

Las ruedas con “shelling” y “spalling” experimentan mayores cargas de impacto como consecuencia del golpeteo de las ruedas ovaladas que aceleran el inicio y propagación de las fisuras, además de poder provocar daño a diferentes elementos del tren, como los rodamientos o las suspensiones.

3.8.3 Inclusiones profundas “Shattering”

Este modo de fallo, normalmente provocado por inclusiones internas situadas en zonas de contacto sometidas a altas tensiones, puede provocar pérdida de material de la llanta y pestaña. Estos defectos causan un alto incremento local en las tensiones y deformaciones.

En la práctica ningún material está libre de defectos y sus efectos dependen de su tamaño, forma y orientación. Las fisuras “shattering” se inician por inclusiones de óxido de aluminio en las ruedas forjadas. Las inclusiones de alúmina pueden tener varios orígenes: productos de desoxidación que no desaparecen durante el fundido, reoxidación durante el vertido del lingote o trozos de material cerámico del horno o de los cucharones refractarios.

La pureza de los aceros usados en el ferrocarril ha sido una de las mejoras destacables en lo que concierne a los proveedores de ruedas, especialmente con el incremento de velocidades en Europa. Se han incorporado medidas de pureza, así como muchos métodos de ensayos no destructivos para evitar ruedas con “shattering” en servicio. La medida de pureza, así como los END se realizan después del tratamiento térmico y del mecanizado de las ruedas.

Estos defectos se propagan normalmente paralelos a la banda de rodadura hacia el exterior de la misma, antes que propagarse hacia el interior de la rueda. Una vez la fisura se ha iniciado, la propagación es rápida bajo las condiciones normales de carga de la rueda. Sin embargo para que se inicie la fisura es necesario que se produzca una gran carga, como un impacto.

La mayoría de las ruedas afectadas por este tipo de daño, son ruedas relativamente nuevas, habiendo también un pico para ruedas próximas al fin de su vida

Tras uno o varios reperfilados y vuelta al servicio, la fisura continuará creciendo convirtiéndose en daño “shattering”. Esto explica el que aparezcan también ruedas con este tipo de daño casi al final de la vida de la rueda.



Figura 3.36 Fallo en rueda por “Shattering”

3.8.4 Fisuras térmicas

Son fisuras muy peligrosas para las ruedas, frecuentes en vagones de mercancías donde los frenos se aplican directamente sobre la banda de rodadura. Se deben a frenadas anormales, a la introducción de un flujo de calor en zonas de pequeña sección de la llanta o a la fricción de materiales que son agresivos al acero.

Estas fisuras se originan por fatiga como consecuencia del resultado de distintos ciclos térmicos. Tras su origen, se propagan en dirección axial si existe un campo de tensiones de tracción, hasta el momento en que se produce la fractura frágil, donde se produce el crecimiento inestable de la grieta que provoca la rotura catastrófica de la rueda. Otra posibilidad es que estas fisuras, originadas en la superficie como fisuras axiales, se desvíen bajo la influencia de las cargas mecánicas en grietas circunferenciales.

Para las ruedas europeas, que son ruedas forjadas, las fisuras térmicas aparecen con más frecuencia en la banda de rodadura, en las proximidades de la cara externa. Sin embargo, para las ruedas americanas (ruedas coladas) es más frecuente encontrar este tipo de grietas en las proximidades de la pestaña.

CAPÍTULO 4: MECÁNICA DE LA FRACTURA EN RUEDAS FERROVIARIAS

4.1 INTRODUCCIÓN

La fractura es el mayor problema que puede tener una rueda ferroviaria ya que si esta se produce genera normalmente el descarrilamiento del tren, es por tanto de especial interés conocer su mecánica.

La mecánica de la fractura ha jugado un papel crítico en la mejora de los materiales rodantes. Resulta curioso ver, como la teoría de la mecánica de la fractura era conocida desde hacía tiempo pero no se había aplicado al mundo ferroviario hasta hace relativamente poco tiempo.

Cuando se comienza a observar ferrocarriles afectados por fallos inesperados en ruedas debido a los aumentos de carga y velocidad, es cuando se empieza a introducir especificaciones en los materiales de suministro europeos de criterios de ensayos preventivos contra fractura frágil.

En el año 1991 los ferrocarriles suizos se ven afectados por un duro descarrilamiento y desde entonces el Instituto de Metalurgia de este país se compromete él mismo con la cuestión de cómo mejor definir los materiales de las ruedas y cómo usar los parámetros de la mecánica de fractura en este contexto. Los resultados obtenidos tras el estudio del descarrilamiento en Stein-Säckingen [7] muestran claramente que la tenacidad de fractura de la rueda era insuficiente. La figura 4.1 y 4.2 muestra la rueda dañada y la trayectoria de la fisura, la cual crece de forma radial hacia el eje de la rueda. La fisura se origina en la superficie exterior de la llanta y el tamaño de fisura crítico, que lleva a la fractura, es de 25 mm de longitud. Con este trabajo se consigue la motivación y el compromiso para la introducción de la mecánica de fractura en la industria del ferrocarril.



Figura 4.1 Rueda fracturada por el descarrilamiento de Stein-Säckingen



Figura 4.2 Superficie final de fractura con el inicio de la fisura crítica (círculo)

4.2 MEDIDA DE LA TENACIDAD DE FRACTURA EN ACEROS R7

Los primeros estudios en tenacidad de fractura comenzaron en 1989 por el comité de especialistas B169 de la ERRI [8] [9]. La tarea del grupo fue definir un procedimiento de ensayo de tenacidad en ruedas de ferrocarril con calidad, además mostró con claridad que la tenacidad de fractura podía ser una norma de calidad del acero. Este valor se conoce en muchas áreas técnicas y en muchas ocasiones es requerido como una condición de suministro.

La mecánica de fractura se encargaría de responder a preguntas tales como qué tamaño de fisura puede ser tolerado conociendo la carga a la que está sometida o cuál es el tamaño crítico de fisura.

Si bajo tensiones mecánicas o residuales una fisura alcanza su valor crítico, la fractura se produce. Esto también se puede explicar cómo que la fractura ocurre, cuando el factor intensidad de tensión K_I alcanza un valor crítico K_{IC} . K_{IC} es la llamada tenacidad de fractura y es la medida de la resistencia de un material a rotura.

Ruedas acorde a la norma UIC pueden romper en servicio como resultado de tensiones residuales debido a frenadas continuas. La tenacidad de fractura de estas ruedas generalmente se encuentra entre $40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ y $80 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. La investigación llevada a cabo por este grupo en un banco de frenado muestra que ruedas con $K_I > 100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ no rompen en zonas donde ruedas con $K_I \sim 65 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ pueden romper. Este resultado se confirma por medidas en ruedas que han roto en servicio. Por tanto es necesario modificar las condiciones de los suministros de manera que se garantice un valor mínimo de tenacidad de fractura en torno a $80 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ [10].

El factor intensidad de tensiones K_I puede ser calculada usando la siguiente ecuación:

$$K_I = 1.32 \cdot \sigma_n \cdot \sqrt{a}$$

donde:

- σ_n : tensión aplicada en servicio.
- a : longitud de fisura
- 1.32 es un valor que depende de la geometría de la grieta y de la pieza.

Con las medidas de longitud de fisura de una rueda fracturada y la tenacidad de fractura K_{IC} es posible obtener una estimación de las tensiones residuales en el borde de la rueda. Para un valor de K_I de $70 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ y una longitud de fisura crítica de 20 mm se obtiene una tensión residual de $\sigma_n = 375 \text{ MPa}$ (ver Figura 4.3).

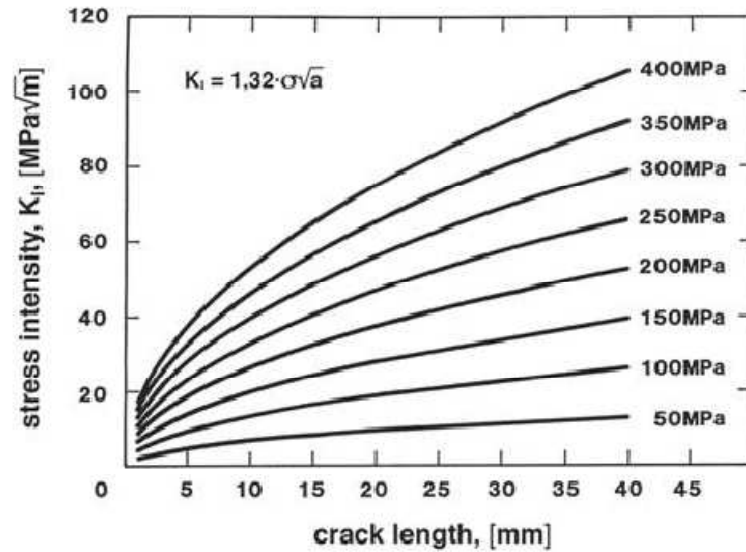


Figura 4.3 Factor intensidad de tensiones en función de la longitud de fisura para diferentes tensiones

4.3 MEDIDA DE LA TENACIDAD DE FRACTURA POR EL MÉTODO ESTÁNDAR

El procedimiento principal para llevar a cabo ensayos de mecánica de fractura está publicado en las normas ASTM E 399 [11]. Muestras CT (tensión compacta) se utilizan a menudo para realizar el ensayo (ver Figura 4.4). Para el ensayo de K_{IC} acorde a ASTM E 399 la carga P y el desplazamiento de apertura de la fisura v , son medidos en la línea de carga. Podemos ver los resultados en las Figuras 4.5 y 4.6, para la representación se utiliza el método de la secante.

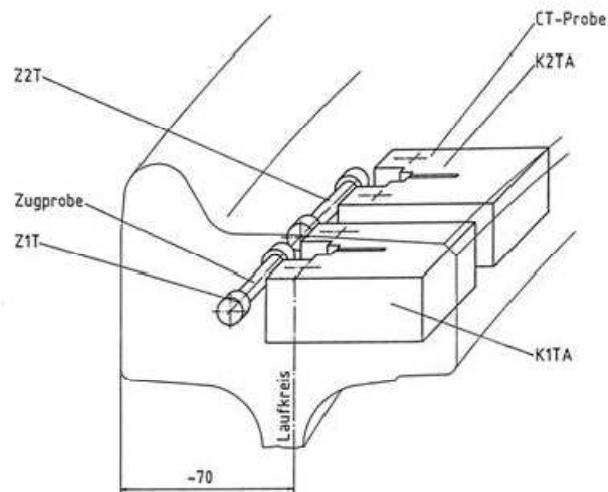


Figura 4.4 Probeta CT y orientación dentro de la llanta de rueda

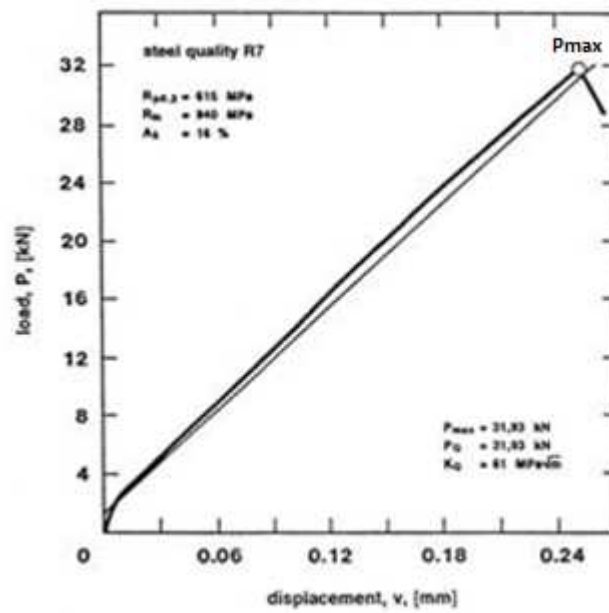


Figura 4.5 Curva de carga frente a desplazamiento para un ensayo válido de K_{IC} acorde con la norma

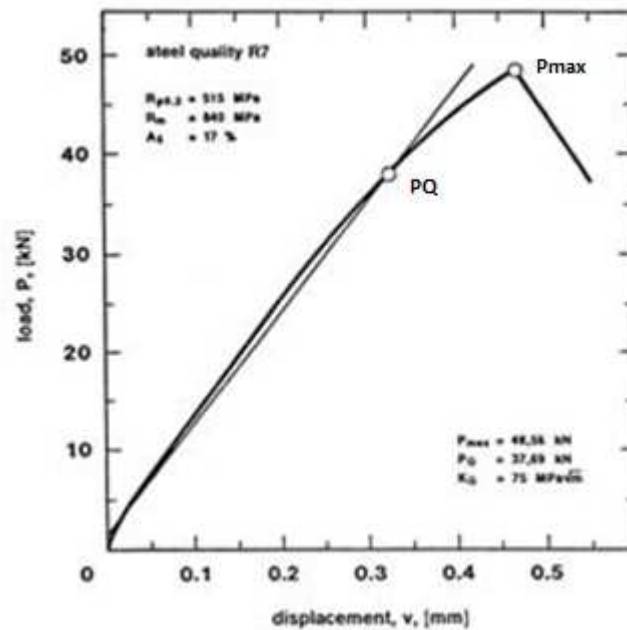


Figura 4.6 Curva de carga frente a desplazamiento con un incremento adicional en el desplazamiento y con deformación plástica

Sin embargo, la experiencia ha demostrado que los requerimientos de la norma ASTM, aplicada para determinar la tenacidad de fractura en ruedas ferroviarias, a menudo no se cumplen, especialmente cuando esos valores de tenacidad son muy

elevados. Los métodos usados para obtener los resultados de los ensayos que muestran cómo interpretar la mecánica de fractura son descritos a continuación. Precisamente estos requisitos son los que a menudo no se cumplen.

- criterio de ensayo de espesor probeta (1):

$$B, a \geq 2.5 \left(\frac{K_I}{R_{p0.2}} \right)$$

donde:

- B es el espesor de la probeta
- a es la longitud de fisura
- $R_{p0.2}$ es la resistencia a ser mecanizado

- el cociente (2)

$$\left(\frac{P_{MAX}}{P_Q} \right) = 1.1$$

donde:

- P_{max} y P_Q son las cargas del ensayo (ver Figura 4.5, 4.6)

El factor intensidad de tensiones K_I se determina como:

$$K_I = \frac{P_Q}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot \left(\frac{a}{W} \right)$$

donde:

- W es el ancho de la probeta CT
- f (a/W) es función de la geometría

Si las ecuaciones (1) y (2) se cumplen, el valor calculado de K_I es igual a la tenacidad de fractura K_{IC} que en este caso es un parámetro del material.

Respecto a las investigaciones del grupo de trabajo B 169/4 del ERRI, la norma ASTM E 399 fue elegida como método de ensayo para la medida de la tenacidad de fractura. Se mostró, que el resultado (valor de K_I) no estaba influenciado por ningún parámetro de ensayo y que el experimento es reproducible y repetible.

4.4 MEDIDA DE LA TENACIDAD DE FRACTURA POR OTROS PARÁMETROS

A la vez que el grupo B169/4 del ERRI lleva a cabo su trabajo, Lucchini Sidermeccanica [31] [32] mayor fabricante de ruedas ferroviarias para los ferrocarriles italianos Trenitalia, comienza a caracterizar el acero R7T no sólo en términos de mecánica de fractura elástico lineal LEFM (ver Figura 4.7), sino también en términos de mecánica de fractura en régimen plástico PYFM (ver Figura 4.8).

El principal problema que resulta de la mecánica de fractura lineal elástica es que los procesos de liberación y absorción de energía correlacionados con el inicio del crecimiento inestable de fisura, están gobernados por un solo parámetro de intensidad de tensión K_Q , medida de la resistencia de rotura de un material. La tenacidad de fractura K_{IC} es el factor intensidad de tensiones crítico en condiciones elástico lineales. La estabilidad de una fisura en ciertas condiciones de carga se conoce por la comparación entre un valor de K_Q calculado y el valor crítico K_{IC} .

K_Q describe el campo de tensión elástico de la punta de la fisura. Cuando K_Q alcanza el valor crítico K_{IC} comienza la fisura. Si la zona plástica r_p de la punta de la fisura es pequeña, el campo elástico gobernado por K_Q controla el proceso en esta área.

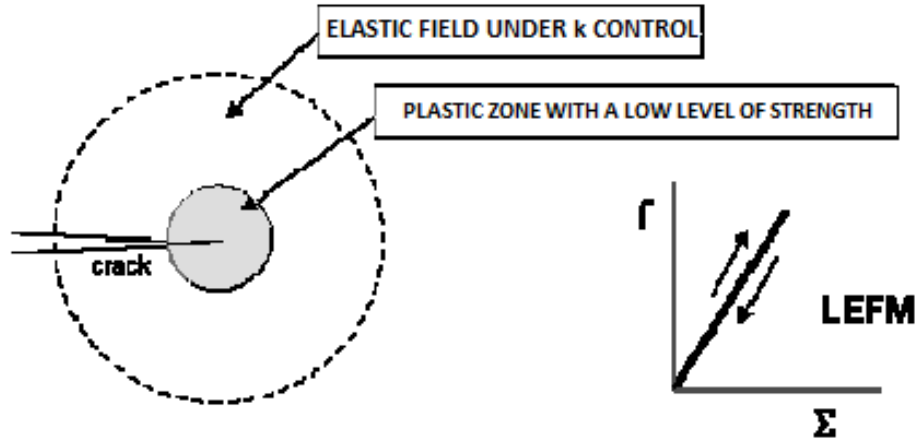


Figura 4.7 Criterio LEFM, aplicado en casos de pequeñas zonas plásticas en extremo de fisura

Cuando r_p aumenta, no es posible encontrar un campo elástico en el extremo de la fisura que sea independiente de la geometría. Así, hay una fuerte interacción entre la influencia de la zona plástica y elástica. La dependencia del campo plástico del espesor de la muestra plantea una dificultad, una fractura producida en laboratorio en pequeñas muestras no representa la estructura original en servicio de la rueda. El parámetro de tenacidad de fractura K_Q puede proporcionar una evaluación parcial de la tenacidad de fractura de ruedas enterizas que no tienen suficiente espesor para obtener condiciones de deformación plana en la punta de la fisura.

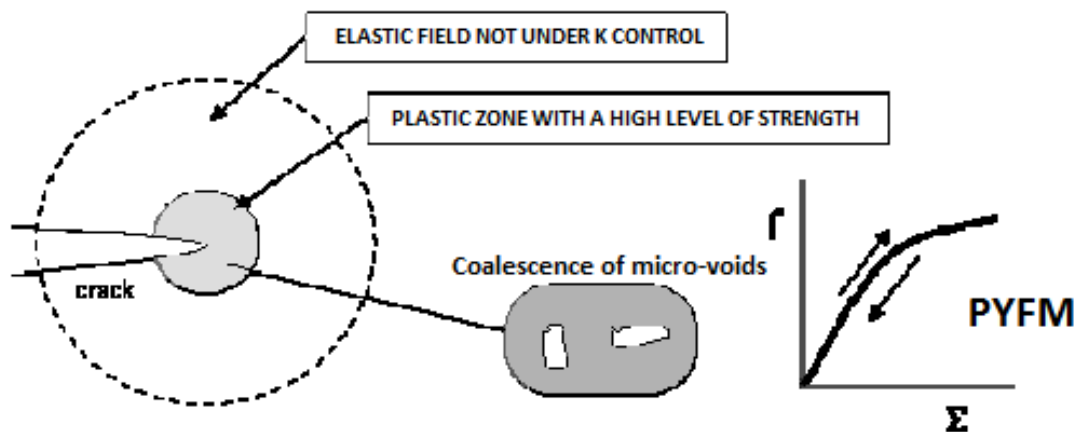


Figura 4.8 Criterio PYFM, aplicado en casos de una gran zona plástica en el extremo de la fisura

Para determinar la tenacidad de fractura para una rueda en condiciones de régimen plástico, son necesarios otros parámetros mecánicos.

4.4.1 Integral-J

Cuando el campo plástico es dominante, se utiliza un parámetro particular llamado Integral-J [12] para representar las características del extremo de la fisura.

J describe las condiciones del extremo de la fisura cuando la fractura no es frágil sino dúctil, y puede ser usado como un criterio de fractura, ya que cuando J alcanza el valor de J_{IC} se inicia la propagación estable de la fisura. Los valores de J_{IC} pueden ser convertidos a valores de K_{IC} . Un ejemplo del procedimiento en el campo del ferrocarril se encuentra en el Documento Técnico DT 251 (B169).

Este método de ensayo se considera muy caro y de mucho consumo de tiempo, aunque sí muy significativo. Por lo tanto se propuso usar otro ensayo con parámetros similares.

La integral J se define en casos planos como una integral de línea, sobre una trayectoria que envuelve al vértice de una fisura, y que es independiente del camino de integración Γ .

$$J = \int_{\Gamma} \left(w dy - t_i \frac{du_i}{dx} ds \right)$$

donde:

- $w = w(x, y) = \int \sigma d\varepsilon$ es la densidad de energía de deformación.
- t_i son las componentes de vector tensión (orientado según la normal exterior a Γ).
- u_i son las componentes de campo de desplazamientos.

4.4.2 K_{EE} (metodología de energía equivalente)

La integral J es uno de los parámetros más representativos de la mecánica de fractura, pero como se ha mencionado antes, su determinación es demasiado cara y de consumo de tiempo elevado. Hay otro parámetro, correlacionado a la energía, llamado K_{EE} , que muestra muchas similitudes con J_{IC} y K_{IC} respectivamente, pero es más fácil de obtener.

Para seleccionar este parámetro innovador, se pone especial atención al diagrama carga-desplazamiento. En efecto hay una variación en la linealidad como se ha visto en las figuras 4.5, 4.6. No hay una propagación de fisura inestable pero sí un incremento progresivo del área plástica del fondo de la entalla y alrededor del extremo de la fisura, donde está la máxima tensión. Si se analiza la forma de la curva carga-desplazamiento está claro que el área representa la energía absorbida antes de un fallo inesperado de la muestra en condiciones de régimen plástico locales.

Por estas razones Lucchini Sidermeccanica selecciona el parámetro de energía equivalente K_{EE} de acuerdo a la norma ASTM E992-84, un procedimiento de ensayo que ya ha sido usado para caracterizar los nuevos materiales forjados.

La medida de K_{EE} muestra un método simple y económico para determinar la tenacidad de fractura de muestras que son relativamente pequeñas, casos que no son de deformación plana. Si comparamos las metodologías para evaluar K_Q y K_{EE} , podemos encontrar algunas similitudes pero también algunas diferencias. El parámetro de tenacidad aparente K_Q no es un parámetro de los materiales ya que depende de la geometría y dimensiones de la muestra. K_{EE} combinado con K_Q puede dar información adicional de la tenacidad de fractura de ruedas enterizas. Este puede ser fácilmente usado para definir un criterio de aceptación más completo del material. En efecto, ambos parámetros K_Q y K_{EE} pueden ser evaluados con una sola muestra CT 30 por lo que es muy ventajoso en términos de tiempo y coste.

El parámetro K_{EE} se calcula acorde a la norma usando la curva carga-desplazamiento. Un ejemplo se muestra en la figura 4.9.

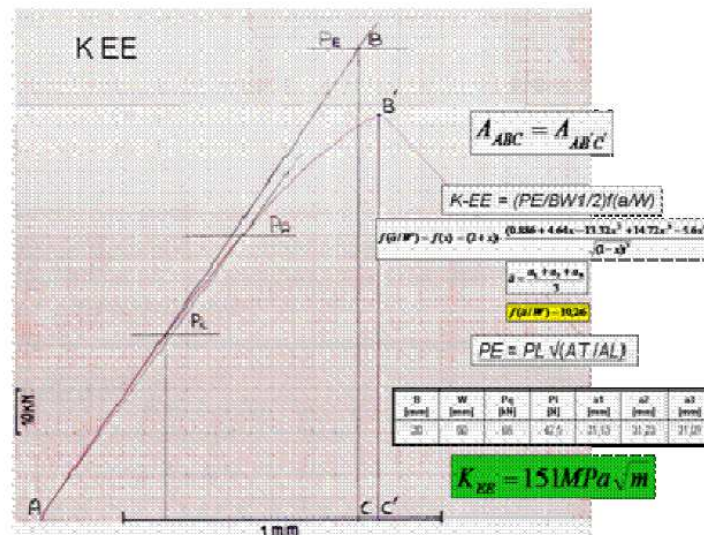


Figura 4.9 Curva de carga-desplazamiento para el ensayo de K_{EE} acorde a ASTM E992

- Si K_Q es mayor que un cierto valor umbral (asumido por $80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) el conocimiento de K_{EE} da información adicional en el comportamiento en el campo elasto-plástico, pero no es necesario. Por otra parte si K_Q es menor que este valor umbral, la evaluación de K_{EE} es esencial.
- Si K_{EE} es menor que un umbral adoptado, se confirma la baja tenacidad de fractura del material.
- Si K_{EE} es mayor, el material puede ser considerado como válido, a pesar del bajo valor de K_Q .

Un buen índice de calidad para las propiedades mecánicas de aceros es el resultado del producto de resistencia a fluencia y tenacidad de fractura. Esta relación está indicada en la Figura 4.10. Modernos desarrollos en acero han doblado este índice de calidad cada década desde 1960.

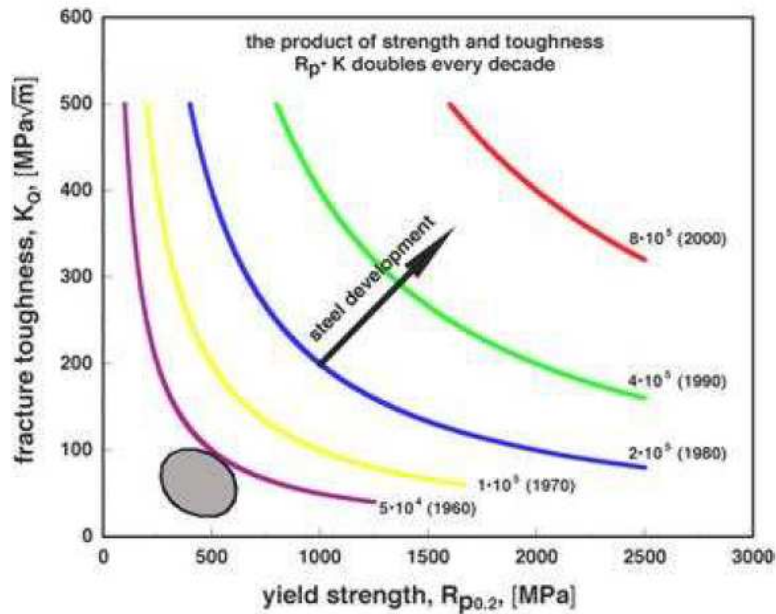


Figura 4.10 Combinación de resistencia y tenacidad de varios aceros. El área sombreada indica el acero R7

Sin embargo, aunque cada vez se obtienen mejores resultados en cuanto a las propiedades mecánicas, hay todavía algunas posibilidades de mejorar la tenacidad y en paralelo la resistencia a fluencia:

- Uso de aceros limpios (bajos contenidos de sulfuros y fosfuros y otros residuos).
- La reducción de inclusiones muestra un incremento favorable en tenacidad de fractura.
- Un buen análisis químico equilibrado. Algunos elementos causan una disminución en la tenacidad (Ti), otros un incremento en la tenacidad (Ni).
- Estructura perlítica homogénea con una cantidad de ferrita en torno al 10%-15%, preferentemente en el límite de grano, y un tamaño de grano fino.
- Un tratamiento térmico equilibrado.

CAPÍTULO 5: INSPECCIÓN DE RUEDAS FERROVIARIAS

5.1 INTRODUCCIÓN

Queda claro que en los materiales, y en particular en los aceros empleados en las ruedas ferroviarias, es inevitable la presencia de defectos, tanto a escala macroscópica como microscópica. Estos defectos o son intrínsecos del material o bien se producen en los procesos de fabricación o durante la operación de los mismos (como fisuras de fatiga) [10].

El problema que se plantea es que la fiabilidad del componente o su ciclo de vida a fatiga, depende junto con otros factores del tamaño de la fisura. Conocer el tamaño de la fisura no resulta sencillo. Existen numerosos métodos, sin embargo, cada uno tiene sus limitaciones y complicaciones, además el que en ocasiones no encontremos fisuras, no quiere decir que no las haya, sino que la resolución del aparato no es suficiente para detectarlas, en cuyo caso se tendrá que suponer para cálculos futuros que se tienen fisuras cuya longitud será la mínima que el aparato en cuestión sea capaz de medir [12].

En el caso que nos ocupa, un ensayo no destructivo consiste en el examen de un componente de tal forma que no impida su utilidad futura. Aunque en la mayoría de los casos los ensayos no destructivos no dan una medición directa de las propiedades mecánicas, son muy valiosos para localizar defectos superficiales e internos (grietas, inclusiones, porosidad) en los materiales que podrían afectar el funcionamiento de un componente cuando entra en servicio.

Las ventajas más destacadas de los ensayos no destructivos son [13]:

- Se lleva a cabo directamente sobre piezas fabricadas.
- Se puede aplicar al 100% de la producción o una pieza representativa.
- El ensayo se puede repetir o realizar otros ensayos sobre la misma pieza.
- Se puede realizar el ensayo sobre piezas en funcionamiento; controlando los efectos acumulados durante la vida en servicio
- Requiere una sencilla preparación de la muestra.
- El equipo es portátil.

Entre las limitaciones de los ensayos no destructivos se encuentran:

- Los resultados requieren un análisis por parte de trabajadores cualificados.
- Puede haber diferentes análisis realizados por diferentes especialistas.
- Las propiedades son analizadas comparativamente.
- Suele requerir una inversión grande de capital.

Existen diversos ensayos no destructivos para ruedas de ferrocarril a continuación se procederá a estudiar cada uno de ellos, además se analizará qué ensayos se están realizando actualmente por las empresas ferroviarias más importantes.

5.2 INSPECCIÓN VISUAL

Se trata del método más sencillo y al que además se recurre siempre en caso de obtener una indicación de fallo de otro tipo de sistema. Incluso mientras se utilizan otras técnicas para la detección de fisuras, la inspección visual es un complemento de gran utilidad. Es la primera fase de la inspección, muchas veces requisito esencial para otros ensayos.

Permite detectar y examinar una gran variedad de defectos a nivel superficial como pueden ser: soldaduras y uniones defectuosas, dimensiones erróneas, ajustes defectuosos, componentes incompletos, acabado superficial defectuoso, grietas, cavidades, marcas etc.

Los métodos de inspección visual, pueden incluir una gran variedad de equipamientos que permiten desde la inspección visual propiamente dicha, hasta la utilización de microscopios para medición de la profundidad de raspaduras en la terminación de superficies pulidas además de la utilización de útiles ópticos complementarios (lupas, focos, espejos, cámaras de video, etc.) [13].

5.3 ANÁLISIS ACÚSTICO

Se trata de un método usado desde muy antiguo. Las ruedas con defectos, si son golpeadas con un martillo, suenan de diferente manera que las ruedas que no tienen defectos. La rueda deberá ser excitada de manera que vibre, analizando el sonido obtenido, ya que la aparición de discontinuidades en la rueda, como son las fisuras, provocan distintos modos de vibración y como consecuencia distintos sonidos.

Hay que distinguir este método de las modernas técnicas de vibraciones, ya que a pesar de que se analizan las vibraciones el objetivo de este análisis es analizar el sonido que emite la rueda.

5.4 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Con este método se buscan grietas superficiales o próximas a la superficie, magnetizando en la dirección circunferencial. El ensayo se basa en el principio de distorsión de un campo magnético alrededor de un defecto perpendicular a la dirección de dicho campo, es lo que se conoce como fugas de flujo.

La presencia de esta reducción en la continuidad del campo magnético, que indica la presencia de una falla o defecto del material, será detectado por medio del uso de micropartículas ferrosas aplicadas sobre la superficie. Estas partículas se acumularán alrededor del área de discontinuidad.

Esta acumulación nos permite observar la localización, tamaño, forma y extensión de la discontinuidad. Los materiales catalogados como ferromagnéticos incluyen hierro, níquel y cobalto también muchos de los aceros inoxidables se vuelven magnéticos con los años.

Las ventajas de esta técnica es que es sencilla y de bajo coste, es posible detectar grietas de 1 micra de ancho, y además es relativamente rápida comparada con otras inspecciones, las limitaciones de esta técnica son que la pieza debe ser ferromagnética y además se necesita desmagnetización del material posterior a la realización del ensayo, también puede dar lugar a falsos positivos debido a uniones con diferentes propiedades magnéticas, superficies rugosas, superficies cubiertas por una capa no magnética.

El ensayo por partículas magnéticas puede ser realizado con partículas visibles o con partículas fluorescentes (ver Figura 5.1).

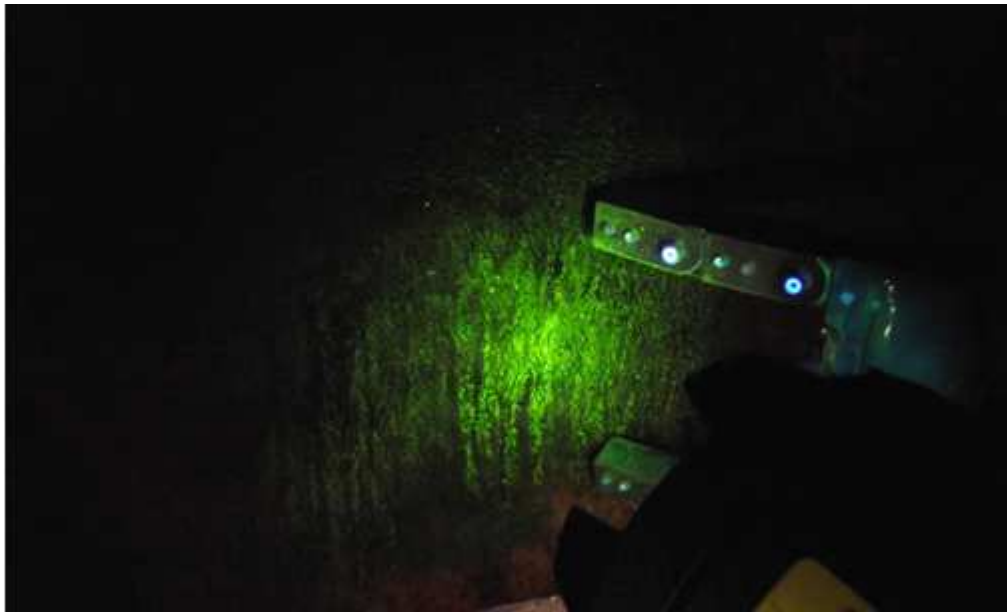


Figura 5.1 Inspección con partículas magnetizables

5.5 CORRIENTES DE EDDY

También conocidas como corrientes de Foucault o corrientes parásitas, es un método que se utiliza para inspeccionar eléctricamente materiales conductores en busca de defectos superficiales, irregularidades en estructura y variaciones en composición. En este ensayo, si una fuente de corriente alterna se conecta con una bobina se produce un campo magnético variable. Cuando este campo se coloca cerca de una muestra, capaz de conducir una corriente eléctrica, se inducirán en la muestra corrientes parásitas. A su vez, estas corrientes producirán un campo magnético propio [18].

La unidad de detección medirá este nuevo campo magnético y convertirá la señal en un voltaje que puede leerse en un medidor o en un tubo de rayos catódicos.

Propiedades como la dureza, la composición de la aleación, la pureza química y la condición de tratamiento térmico influyen en el campo magnético y se pueden medir directamente con el uso de una sola bobina.

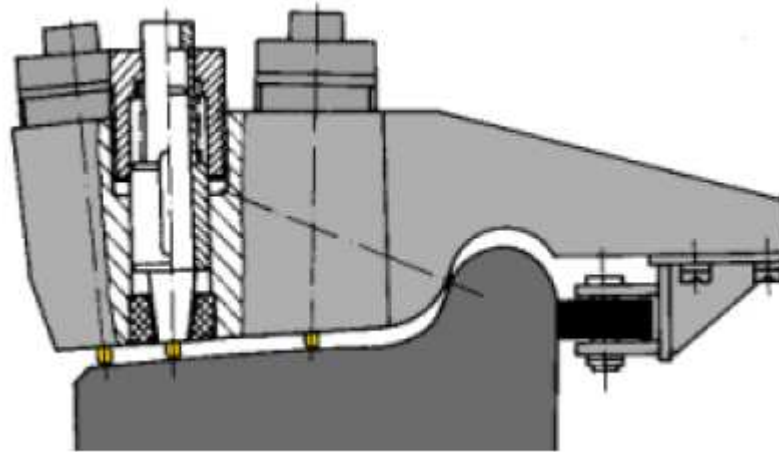


Figura 5.2 Posición de los sensores de corrientes de Eddy

5.6 LÍQUIDOS PENETRANTES

Es un método utilizado para revelar discontinuidades en superficies sólidas o materiales esencialmente no porosos. Permite encontrar indicios de un amplio espectro de fallos independientemente de la configuración de las piezas o la orientación de los fallos. Los líquidos penetrantes trabajan ingresando en discontinuidades superficiales por acción capilar; es debido a ello que este método es aplicable a todo tipo de fallos superficiales como las fisuras, porosidades, áreas encogidas, laminaciones, y discontinuidades similares.

El equipamiento utilizado para estas prácticas puede variar entre simples botes de tinta y reveladores hasta sofisticados sistemas computerizados; sin embargo, el establecimiento de procedimientos y estándares de control es el punto clave para la obtención de resultados óptimos.

Las limitaciones de este método es que sólo permite detectar aquellas fisuras que se encuentran abiertas al exterior, además las superficies rugosas o porosas, pueden generar interferencias en la inspección, también los recubrimientos, cascarilla y contaminaciones pueden ocultar defectos.

Una inspección por líquidos penetrantes requiere de un penetrante líquido coloreado, el cual es aplicado sobre la superficie a inspeccionar; tras dejar un tiempo de penetración debe ser eliminado totalmente de la superficie, aplicando posteriormente un

elemento revelador que actúa absorbiendo el líquido de la discontinuidad y dándole un contraste de color para que sea visible. El proceso conlleva un consumo alto de tiempo y esfuerzo [19] (ver figura 5.4).

Los líquidos penetrantes se clasifican en:

Según la solubilidad:

- *Penetrantes lavables con agua o autoemulsificables:* Para su limpieza y eliminación de excesos simplemente se usa agua. Resultan muy económicos de utilizar.
- *Penetrantes postemulsificables:* No son solubles en agua. Para la eliminación de los excesos superficiales se utiliza un emulsificador que crea una capa superficial que se remueve con agua. Es el método con el que mayor sensibilidad se obtiene y en el que mayor dominio de cada una de las etapas tiene el operador. Existen dos tipos de emulsificadores: los hidrofílicos, de base acuosa, que se utilizan en solución de agua, en una saturación determinada por las necesidades del caso; y lipofílicos, de base aceite, que se utilizan tal como los entrega el fabricante.
- *Penetrantes eliminables con disolvente:* Tampoco son solubles en agua. Para su eliminación se utiliza un disolvente no acuoso, denominado «eliminador». Son muy prácticos de utilizar ya que el solvente generalmente se presenta en aerosol.

Según el color:

- *Penetrantes coloreados:* Se inspeccionan a simple vista. Solamente hay que contar con una buena fuente de luz blanca. Tienen menos sensibilidad (ver Figura 5.3):
- *Penetrantes fluorescentes:* Se inspeccionan con la ayuda de una lámpara de luz ultravioleta (luz negra) si éstas no son invisibles a simple vista. Tienen mayor sensibilidad (ver Figura 5.3):

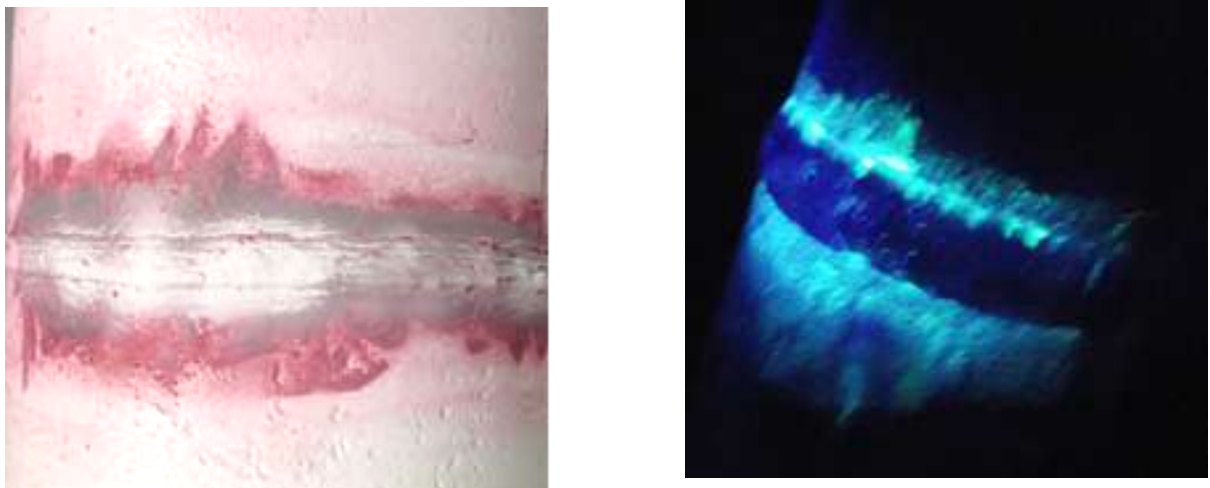


Figura 5.3 Inspección por líquidos penetrantes visible (izq) y fluorescente (drcha)

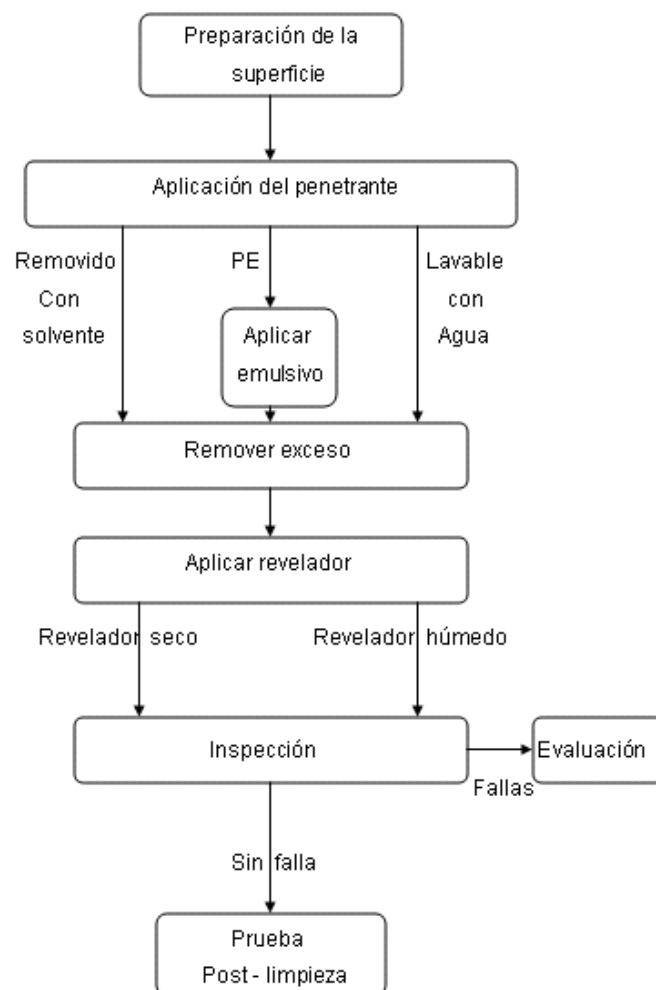


Figura 5.4 Diagrama general de la aplicación de líquidos penetrantes

5.7 RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL: RAYOS γ Y RAYOS X

Nombre general dado a los métodos de inspección basados en el análisis del diferencial de absorción de radiación penetrante por parte del material inspeccionado. Debido a las diferencias de densidades y variaciones en los espesores de las partes o diferencias en las características de absorción causadas por variaciones en la composición, diferentes porciones del elemento testeado absorbe diferentes cantidades de radiación. Estas variaciones pueden ser monitorizadas a través de la detección de la radiación absorbida que pasa a través de la pieza. El término radiografía generalmente se aplica al método específico que produce una imagen permanente en un film (radiografía convencional). Las dos técnicas más estandarizadas son las de radiografía por rayos X o por rayos γ (gammagrafía).

La diferencia fundamental de los rayos X con los rayos gamma es su origen: los rayos gamma son radiaciones de origen nuclear que se producen por la desexcitación de un nucleón de un nivel excitado a otro de menor energía y en la desintegración de isótopos radiactivos, mientras que los rayos X surgen de fenómenos extranucleares, a nivel de la órbita electrónica, fundamentalmente producidos por desaceleración de electrones. La energía de los rayos X en general se encuentra entre la radiación ultravioleta y los rayos gamma son producidos naturalmente [20].

- **Características de los Rayos X:**
 - Nivel de energía ajustable (voltaje)
 - Alta intensidad: Mayores voltajes producen mayores intensidades, longitudes de onda más cortas y mayor penetración.
 - Se pueden aplicar a todos los materiales. Aunque existen algunos problemas con materiales de densidades muy altas o muy bajas.
 - Produce imágenes de buen contraste y sensibilidad.
 - Pueden apagarse

- **Características de los Rayos γ :**

- Energía muy alta y poder penetrante. Energía fija para cada tipo de fuente.
- La intensidad de radiación decrece con el tiempo.
- Las fuentes son pequeñas y portátiles, fácil acceso a pequeñas cavidades.
- Pueden utilizarse en todos los materiales.
- No se requiere potencia, no hay peligros eléctricos.
- Bajo coste inicial y de mantenimiento respecto a los rayos X.

La radiografía industrial es utilizada para detectar el estado y características de un componente que exhibe una diferencia en su espesor o densidad física comparado con el material a su alrededor, grandes diferencias son fácilmente detectables al contrario que las pequeñas. En general, por medio de la radiografía pueden observarse en una dirección perpendicular al sentido de la radiación emitida por la fuente correspondiente. Esto significa que la posibilidad de detectar ciertas características dependerá de la correcta orientación de la exposición para cada caso. El método radiográfico es volumétrico ya que mediante el mismo podemos identificar discontinuidades ubicadas en el interior de los elementos inspeccionados, además también es posible dimensionar y localizar fisuras.

Un ensayo radiográfico requiere de un material fotosensible llamado film o película radiográfica, existen distintos tipo de film dependiendo del tamaño de grano de haluro de plata con el que es fabricado; ésta es una variable importante para conseguir buenos resultado en la inspección. Actualmente se están desarrollando técnicas que permiten una visualización en un medio electrónico (ver figura 5.5).



Figura 5.5 Sistema electrónico para visualización de rayos X

Un resumen de la técnica se muestra en la figura 5.6, en la que se puede observar que una fuente emite la radiación necesaria para que en la película quede la imagen sombra [21].

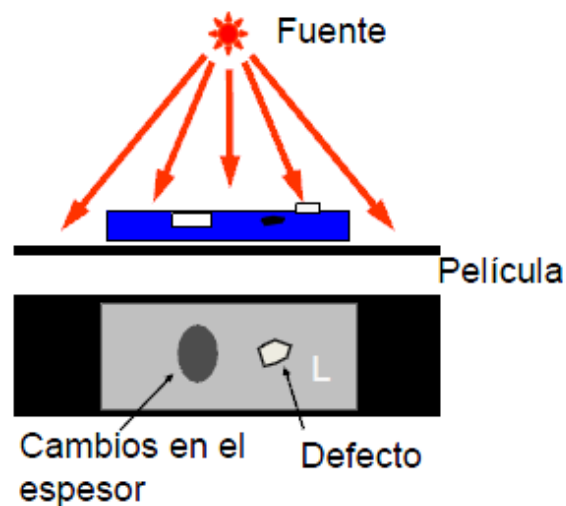


Figura 5.6 Técnica radiográfica

En general las ventajas de los rayos X y rayos γ son la alta capacidad para detectar defectos internos y subsuperficiales así como la detección de discontinuidades superficiales.

Por el contrario las limitaciones de este método son que se dejan sin detectar defectos finos y planos, a menos que sean paralelos al haz. Existen riesgos de seguridad para el trabajador debido a la radiación que se produce y tiene un alto coste económico respecto al resto de END.

5.8 TÉCNICA DE VIBRACIONES

Actualmente se están desarrollando nuevos estudios de mantenimiento predictivos para ruedas de ferrocarril mediante el uso de análisis de vibraciones.

La diagnosis de defectos mediante vibraciones se compone de una entrada de datos, una vez se realiza la medida se procesa la señal para compararla con los patrones existentes sin defectos, el sistema clasifica el porcentaje de similitud con el patrón y se hace un diagnóstico profesional en el que se evalúa el estado del componente a analizar, el sistema sigue el esquema representado en la figura 5.7 [14]:

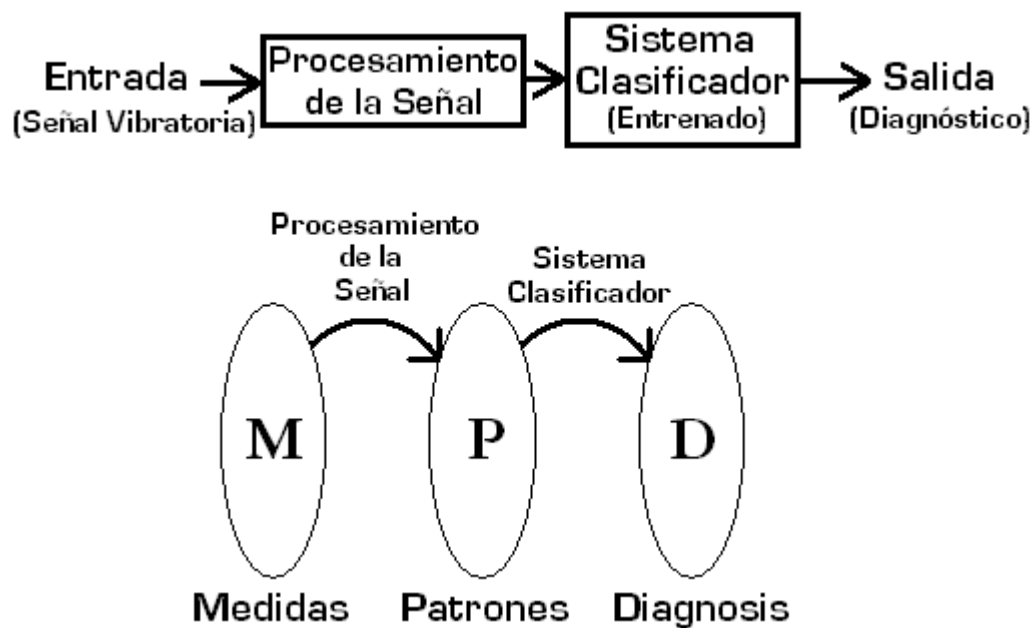


Figura 5.7 Diagnosis de defectos mediante vibraciones

5.8.1 Análisis de un plano en la superficie de rodadura

5.8.1.1 Introducción

Como ejemplo de análisis vibratorio se va a analizar un estudio interesante desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña, en el que se analiza mediante vibraciones la severidad de un plano en la superficie de rodadura [15].

En este trabajo se establece un procedimiento para la detección y la caracterización de planos en la superficie de rodadura de las ruedas de un tren. Para ello, se utiliza el análisis de las vibraciones generadas en el contacto rueda-carril tanto en el dominio temporal, como en el frecuencial, así como en el dominio conjunto tiempo-

frecuencia. Se parte de los registros obtenidos en una extensa campaña de medidas llevadas a cabo en una línea del Ferrocarril Metropolitano de Barcelona (FMB).

En la cuantificación del nivel de vibración producida por un plano, debe tenerse en cuenta que el sistema de medida se encuentra en un punto fijo y que el contacto entre el plano de la rueda y el carril, para diferentes pasos del tren, se produce a distintas distancias del punto de medida. En este trabajo, se estudia el efecto de dicha distancia sobre el nivel de vibración medido con el objetivo de establecer una medida normalizada de la severidad del plano. A partir de esta medida normalizada es posible estudiar la evolución temporal del plano.

Durante un largo periodo de tiempo, se realiza la adquisición de las de señales de vibración generadas por el contacto rueda–carril al paso de los trenes que circulan por la línea 3 del FMB. Con la finalidad de obtener registros representativos a velocidades de circulación del tren lo más constantes posibles, se ha escogido un punto de medida situado en un tramo recto. Las medidas se han realizado en el carril derecho de la vía en sentido de la estación de Palau Reial hacia Zona Universitària en un punto equidistante entre ambas estaciones.

Las vibraciones se detectan mediante dos acelerómetros montados en el pie de carril mediante un utillaje ya que la compañía FMB impone la premisa de no fijar ningún elemento permanente al carril mediante soldadura o agujereado y atornillado (ver figura 5.8).



Figura 5.8 Montaje experimental con el acelerómetro en el interior del utillaje y el sensor extensiométrico

5.8.1.2 Dominio temporal

Las señales registradas al paso de los distintos trenes muestran gran similitud pero debe mencionarse que se presentan algunas diferencias entre ellas. La primera es la duración temporal de la señal asociada a la velocidad del tren al paso por el punto de medida. La segunda diferencia es la posición temporal de los picos producidos por los pasos de las ruedas, debido a las diferentes distancias entre ejes de las ruedas de los distintos modelos de tren. La tercera diferencia es la amplitud de las señales de vibración, debida al estado superficial de las ruedas.

La Figura 5.9 muestra dos registros de vibración correspondientes al paso de un tren sin planos y un tren con planos en una de sus ruedas. El tren sin planos corresponden al tren de matrícula 2016 y el tren con un plano corresponde al de matrícula 3028.

El análisis de multitud de registros temporales de vibración, asociados al paso de trenes, pone de manifiesto que una buena magnitud para identificar los defectos puntuales de las ruedas es la energía de aceleración calculada mediante una ventana temporal corta. Así, sobresalen los picos frente a los valores medios y se atenúa el efecto de los picos espurios. La expresión para su cálculo a partir de un registro de intervalo de muestreo Δt es:

$$E_i = E(i \Delta t) = \left(\sum_{j=0}^{n-1} a_{i+j}^2 \right) \Delta t$$

siendo $n \Delta t$ la duración temporal de la ventana.

La experiencia ganada en el análisis de este tipo de señales permite identificar por inspección directa el instante aproximado del paso de cada una de las ruedas del tren por el punto de medida. Sin embargo esta identificación no es precisa. Para obtener el instante exacto de paso de las ruedas por el punto de medida se utiliza el registro del esfuerzo cortante al que está sometido el carril al paso de cada rueda, determinado mediante el uso de un sensor extensiométrico.

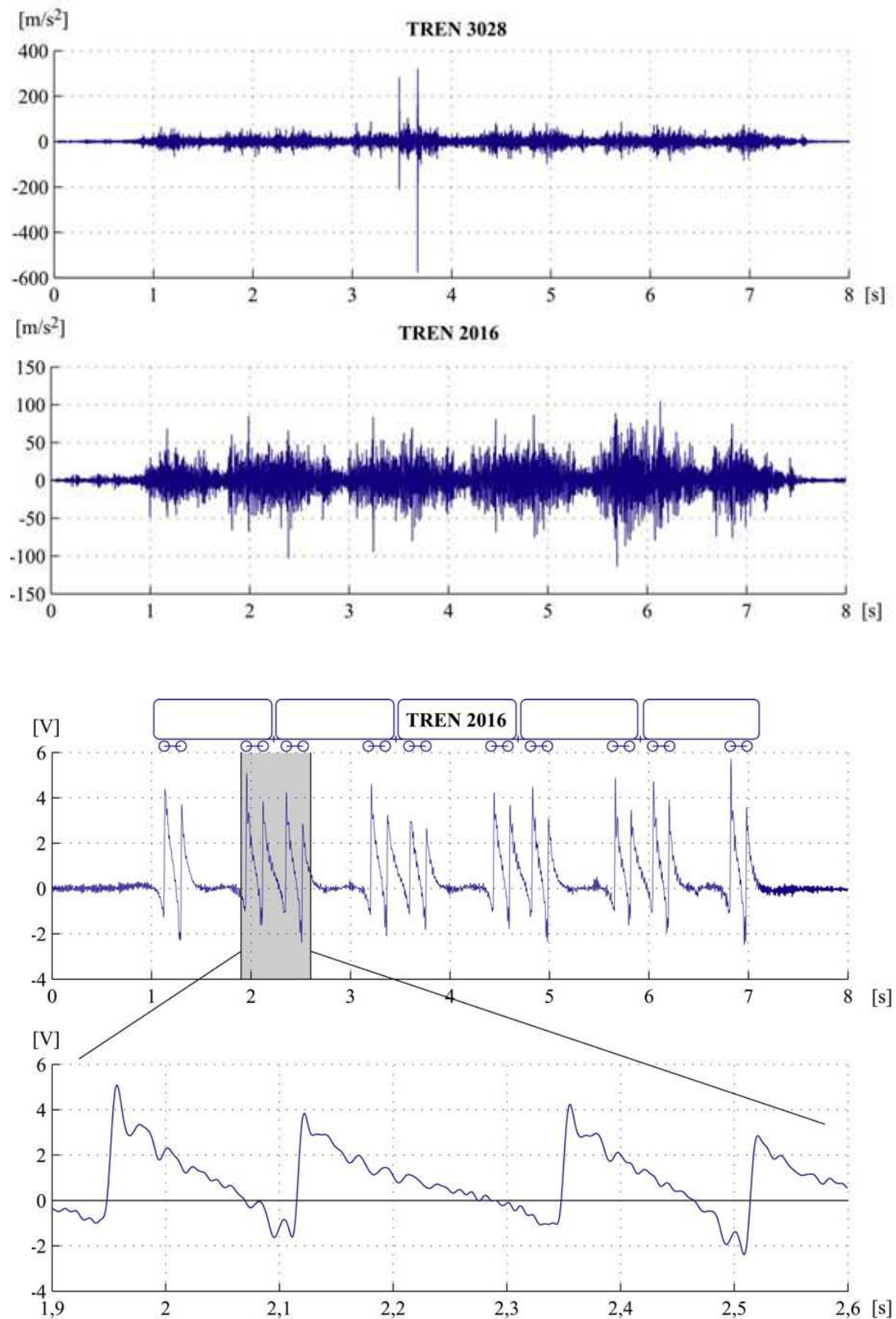


Figura 5.9 Registros temporales de vibración del tren con un plano (3028) y sin planos (2016) y ubicación del instante de paso de cada rueda del tren a partir de la señal del sensor extensiométrico

5.8.1.3 Dominio frecuencial

Con el fin de determinar la información que el análisis espectral proporciona en la determinación y caracterización de la presencia de defectos tipo plano en la superficie de rodadura de una rueda, se calculan los espectros de energía de las señales de vibración adquiridas para los trenes 2016 y 3028, que se corresponden con los registros de vibración de la Figura 5.9. En la Figura 5.10 se pueden observar los espectros de energía de aceleración, calculados por bandas de 1 Hz, para dichos trenes.

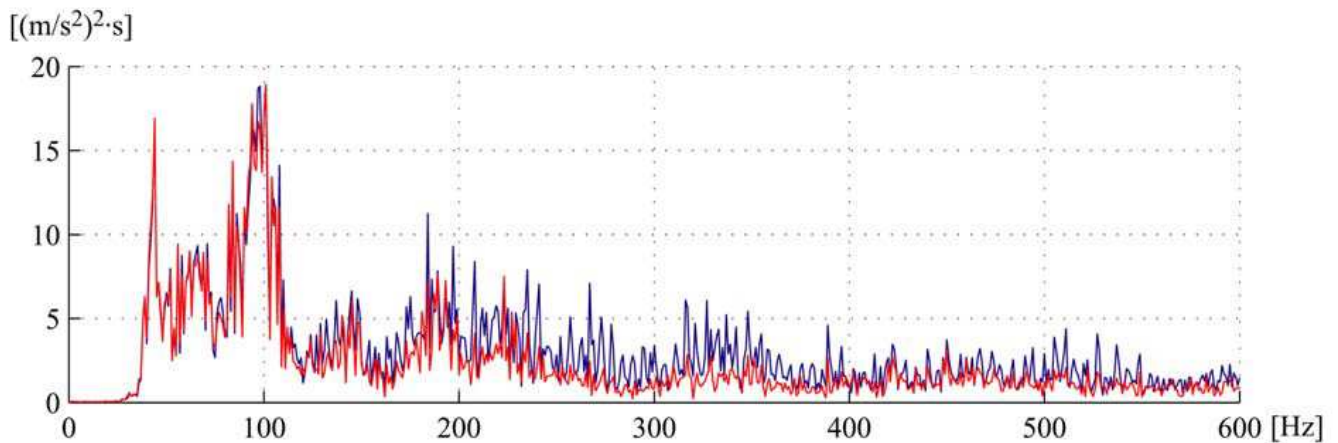


Figura 5.10 Espectros de energía para el tren 2016 (en rojo) y para el tren 3028 (en azul)

Los resultados obtenidos para los distintos registros muestran, en forma general, un incremento en la magnitud de la energía para las componentes de alta frecuencia. Este hecho está asociado a la energía que gana la vibración debido a la fuente de vibración adicional que representa el contacto plano-carril. Por lo tanto, a mayor amplitud del pico de vibración que describe dicho contacto en la señal mayor es el incremento en las altas componentes de frecuencia. A pesar de esto, el análisis espectral de la señal global de vibración no permite atribuir un indicador de la severidad del plano ni identificar la rueda que lo presenta.

5.8.1.4 Dominio conjunto tiempo-frecuencia

En el análisis de las vibraciones estudiadas se presenta la necesidad de estudiar fenómenos localizados en tiempo y frecuencia; es decir, que para su descripción requieren información conjunta de ambos dominios. El análisis de Fourier no es la herramienta adecuada para expresar explícitamente este tipo de información.

En el caso de las señales de vibración no estacionarias, la Transformada de Fourier en tiempos cortos –STFT– y la transformada wavelet –CWT– juegan un papel importante en la búsqueda y/o determinación de las irregularidades y/o defectos en elementos mecánicos. Estas herramientas matemáticas son útiles para determinar características específicas de un sistema que presenta un comportamiento dinámico no estacionario. En este trabajo se usa la STFT.

En la STFT, la señal analizada se divide en pequeños tramos, en los que se supone que la señal es estacionaria, y a los que se aplica la Transformada de Fourier. Esto se realiza utilizando una función ventana de ancho constante que se va desplazando y multiplicando con la señal original. Con la STFT se logra una mejor localización de la aparición de una singularidad en una señal de vibración. Sin embargo, sólo se conoce en qué intervalo de tiempo se produce la singularidad, debido a que la localización depende del ancho elegido para la función ventana.

Además, si la vibración o la señal que la describe tiene distintos eventos éstos no pueden ser resueltos correctamente utilizando la STFT si los rangos de frecuencia que los caracteriza es muy amplio, dado que el tamaño de ventana constante restringe el ancho de frecuencias que es posible identificar. De esta forma, la ventana temporal establece el grado de resolución tanto de tiempo como de frecuencia que se desea. Si la ventana es muy estrecha se analiza una porción muy pequeña de la señal lo que permite tener una buena resolución temporal pero una mala resolución frecuencial y si la ventana es muy ancha se tiene una buena resolución frecuencial pero una mala resolución temporal.

Las señales se han adquirido con una frecuencia de muestreo de 2000 Hz. La STFT se ha calculado utilizando una ventana Hanning de 256 muestras con un solapamiento 224 muestras. Esto proporciona una resolución frecuencial de 7,8125 Hz y una resolución temporal de 16 ms. La resolución temporal junto con la velocidad de circulación del tren representa una resolución espacial de 220 mm, valor en general demasiado grande para una identificación precisa de la situación del plano.

Una forma común de representar la STFT es el espectrograma, gráfico que representa en el eje horizontal el tiempo y en el eje vertical la frecuencia. Mediante el uso de una escala de colores se representa la energía del contenido frecuencial de la señal según va variando ésta a lo largo del tiempo. La expresión de cálculo del espectrograma es:

$$s = 20 \log_{10} (\text{abs}(X))$$

siendo X la Transformada de Fourier de la señal ponderada con la ventana Hanning.

En la Figura 5.11 se muestra el espectrograma correspondiente a una señal de vibración producida por el tren 3028.

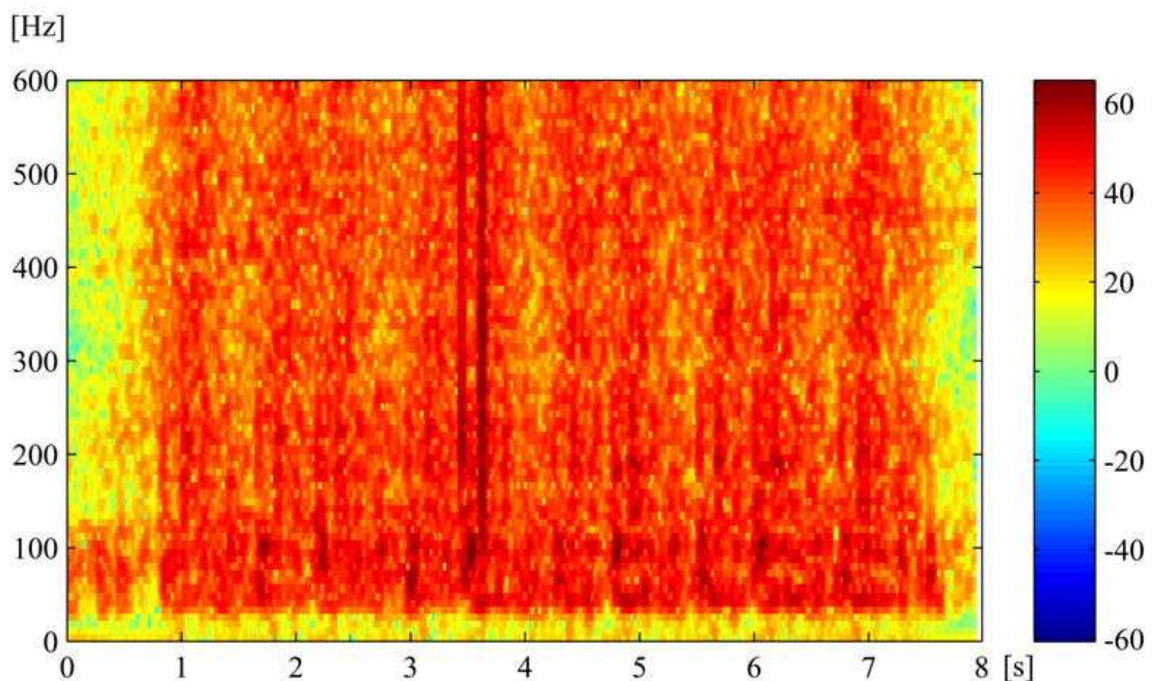


Figura 5.11 Espectrograma de una señal de vibración producida por el tren 3028

5.8.1.5 Conclusiones del estudio

La selección de sensores extensiométricos para la determinación del paso de las ruedas por el punto de medida ha demostrado ser una buena elección puesto que permite establecer con precisión el instante exacto de paso de la rueda sobre el punto de medida.

El análisis en el dominio temporal ha demostrado ser el más eficaz a la hora de detectar defectos tipo plano en la superficie de rodadura de las ruedas del tren.

Los resultados obtenidos en el análisis en el dominio conjunto tiempo–frecuencia de las señales adquiridas mediante el uso de STFT ha demostrado que, con una correcta selección de la función ventana, su tamaño y el solapamiento, se proporciona una, relativamente, buena identificación de la presencia de un plano en la superficie de rodadura de una rueda y la identificación de la rueda del tren que lo presenta, así como su caracterización y evolución.

La caracterización de la severidad de los planos en las ruedas de una manera más precisa necesita buscar modelos que ajusten la variación de la amplitud de la vibración con la distancia entre el punto de contacto y el de medida, así como la atenuación de la vibración a lo largo del carril. Estos son aspectos que se pretenden abordar en futuros trabajos.

5.9 TÉCNICAS DE ULTRASONIDOS

Este tipo de ensayos son los más utilizados a día de hoy y los que mejores resultados están dando. Los métodos ultrasónicos siguen evolucionando y perfeccionándose continuamente aunque todavía no llegan a un nivel de estandarización total.

5.9.1 Principios acústicos

5.9.1.1 Definiciones básicas

Para una mejor comprensión de los fenómenos que ocurren en el ensayo no destructivo de ultrasonidos, se estudiarán algunos conceptos físicos necesarios.

- **Oscilación:** Cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.
- **Periodo:** Tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación, por ejemplo el tiempo en que un cuerpo se mueve un ciclo completo relacionando al momento de estados idénticos. Este se designa por “t” y usualmente es expresado en segundos. En la figura 5.12 se explica el concepto aplicado a un péndulo.

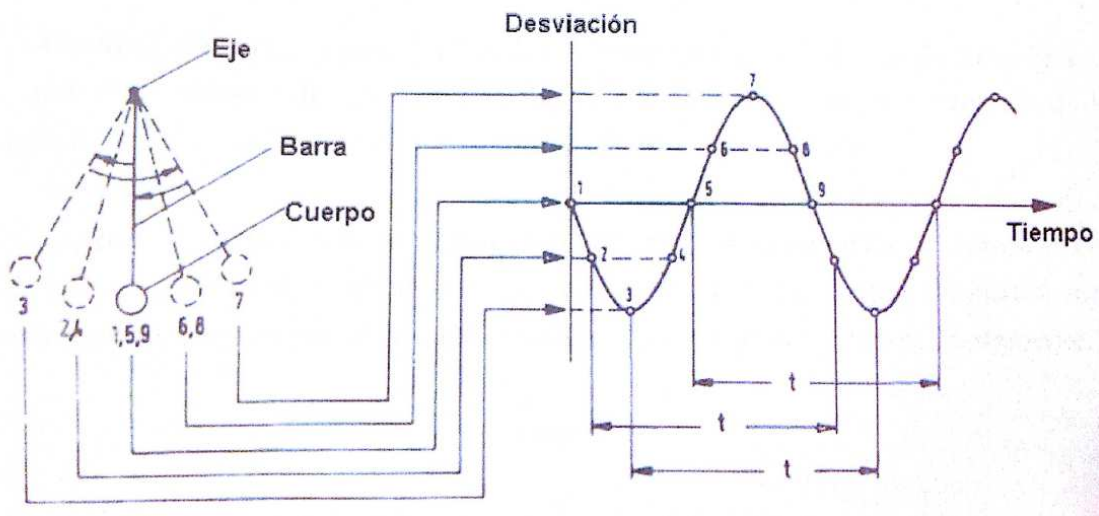


Figura 5.12 Oscilación de un péndulo

- **Frecuencia:** Es la inversa del periodo o el número de oscilaciones (ciclos) por unidad de tiempo. La frecuencia se la designa con “f”, dando la relación:

$$f = \frac{1}{t}$$

- **Amplitud:** Es la máxima desviación del cuerpo oscilante desde la posición de equilibrio. Si la amplitud, designada por “A”, es constante en el tiempo, la oscilación es no amortiguada, si esta decrece en el tiempo, se la llama amortiguada (ver figura 5.13).

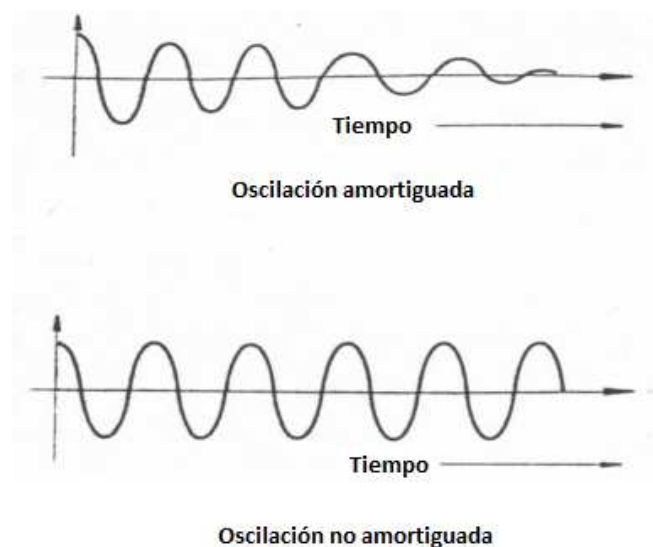


Figura 5.13 Oscilaciones amortiguada y no amortiguada

- **Onda:** Es la propagación de una oscilación y sucede cuando una partícula oscila transmitiendo su vibración adyacente. Las partículas adyacentes tienen una diferencia de fase constante.
- **Velocidad de propagación (velocidad sónica):** Es la velocidad de propagación de una onda en un material, esta es una propiedad del material. Es designada por “c”.
- **Longitud de onda:** Es la distancia entre dos puntos adyacentes de condición de oscilación equivalente o igual fase. La longitud de onda es una magnitud muy importante, designada por “ λ ” y cuya relación con otros parámetros es:

$$\lambda = c \cdot t$$

La propagación de las ondas puede ocurrir en dos direcciones, en función de esto, existen dos tipos de onda:

- **Onda longitudinal:** donde la dirección de oscilación de las partículas coincide con la dirección de propagación de la onda.
- **Onda transversal:** donde la dirección de oscilación de la partícula es perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

Respecto a las ondas sonoras en oposición a las ondas magnéticas, calóricas o lumínicas, se propagan por un medio material. Los gases y líquidos no ofrecen ninguna resistencia a los efectos cortantes, por lo que las ondas transversales no podrían propagarse en estos medios. En materiales sólidos, se pueden propagar tanto las ondas longitudinales como las transversales, así como todas sus combinaciones.

En cuanto a las frecuencias, se sabe que no todas ellas son audibles para el oído humano. De acuerdo con los convenios internacionales, el rango es subdividido como sigue (ver Figura 5.14) [22]:

- **Subsónico:** $f < 16$ Hz, rango de vibración debajo del límite audible. No se escuchará ningún tono, solo se notará presión.
- **Sonido audible:** Se encuentra entre los 16 Hz y los 20 KHz, es el rango de frecuencias audible por el ser humano.
- **Ultrasónico:** $f > 20$ KHz, estas frecuencias están por encima del límite de escucha humana. Las frecuencias usuales para los ensayos no destructivos se encuentran en el rango de 0,5 a 25 MHz.

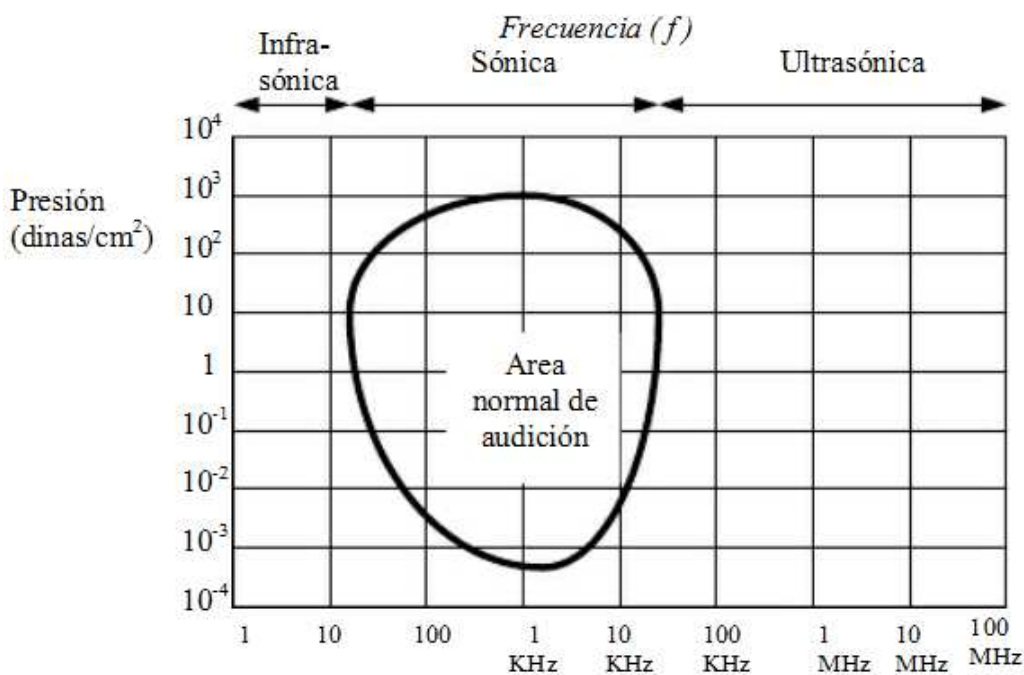


Figura 5.14 Espectro acústico

5.9.1.2 Comportamiento de ondas sónicas en superficies límite

Si una onda sónica incide perpendicularmente en la interfase de dos materiales, una parte de la energía sónica es transmitida al otro material, mientras que otra parte será reflejada [23], como se muestra en la Figura 5.15.

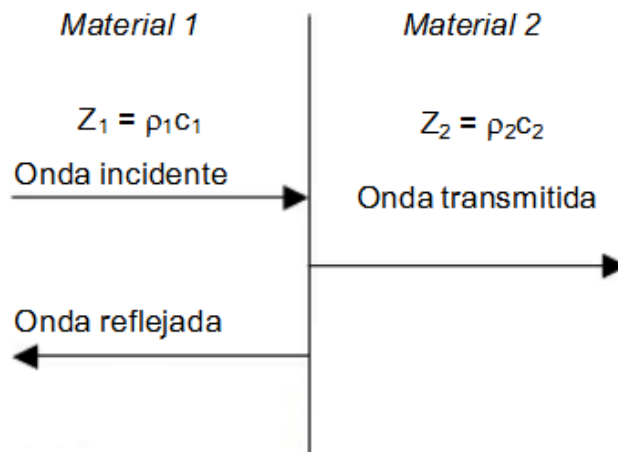


Figura 5.15 Incidencia normal del sonido en la interfase entre dos medios

Las propiedades de energía transmitida y reflejada dependen de la impedancia de los dos materiales. La impedancia acústica se puede calcular como:

$$Z = \rho \cdot c$$

donde:

- ρ es la densidad del material del medio considerado
- c es la velocidad del sonido en el medio considerado.

Si una onda sónica viaja a través de un medio con impedancia acústica Z_1 , e incide perpendicularmente en una interfase correspondiente a otro material con impedancia acústica Z_2 , se puede definir las siguientes magnitudes:

$$\text{Factor de reflexión: } R' = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$\text{Factor de transmisión: } T' = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

El factor de reflexión da la proporción (%) de presión acústica reflejada y el factor de transmisión de la proporción de presión acústica transmitida en el segundo material. Si la impedancia acústica de los dos medios son iguales, no hay reflexión ($R'=0$), y el sonido pasa a través de la interfase sin alterarse. ($T'=1$).

Si la onda sónica incide sobre la interfase con un ángulo oblicuo, los fenómenos que ocurren son considerablemente más complicados que con una incidencia normal. Nuevamente hay una componente reflejada y otra transmitida, pero además origina que parte de la energía acústica sea convertida en otro tipo de onda, por lo que habrá dos ondas reflejadas y dos transmitidas, según se aprecia en la figura 5.16 [24].

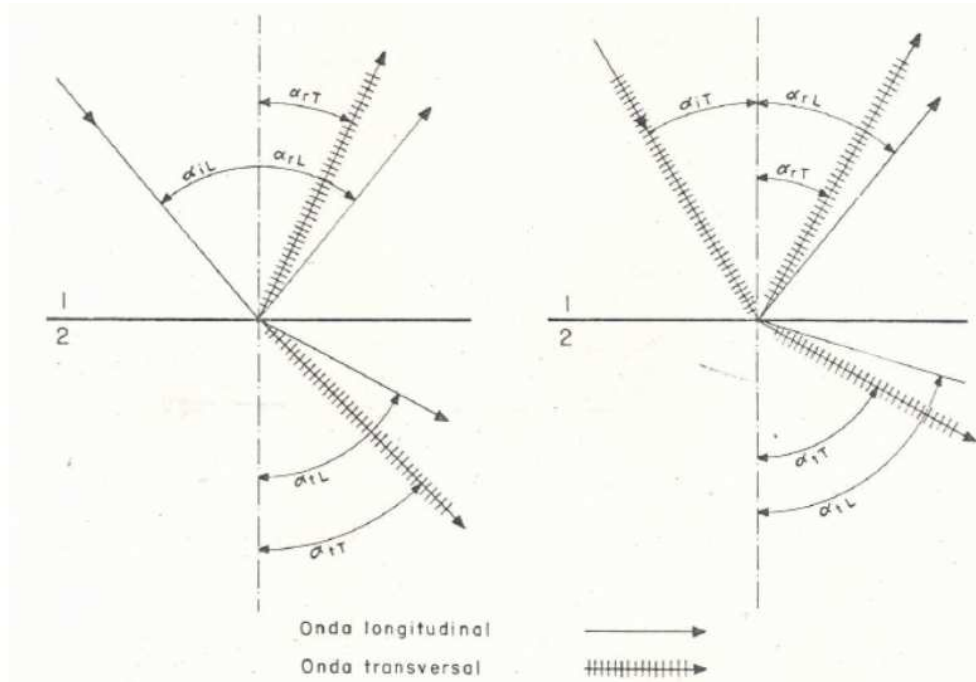


Figura 5.16 Incidencia oblicua de una onda sónica

Por lo que a partir de una onda longitudinal con un ángulo de incidencia oblicuo se creará una onda longitudinal y otra transversal reflejadas y una onda longitudinal y otra transversal refractadas. En medio líquidos y gaseosos, la componente transversal asociada desaparece.

Para estos casos son aplicables las mismas leyes físicas utilizadas en el campo de la óptica, por lo que la Ley de Snell es de aplicación a este caso:

$$\frac{\text{sen}\alpha_1}{\text{sen}\alpha_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

5.9.1.3 Dispersión, difracción e interferencia

Si una onda sónica encuentra un obstáculo, por ejemplo un medio con diferentes propiedades acústicas, pueden ocurrir varios fenómenos, dependiendo del tamaño del obstáculo. Estos fenómenos se explican en relación a la figura 5.17.

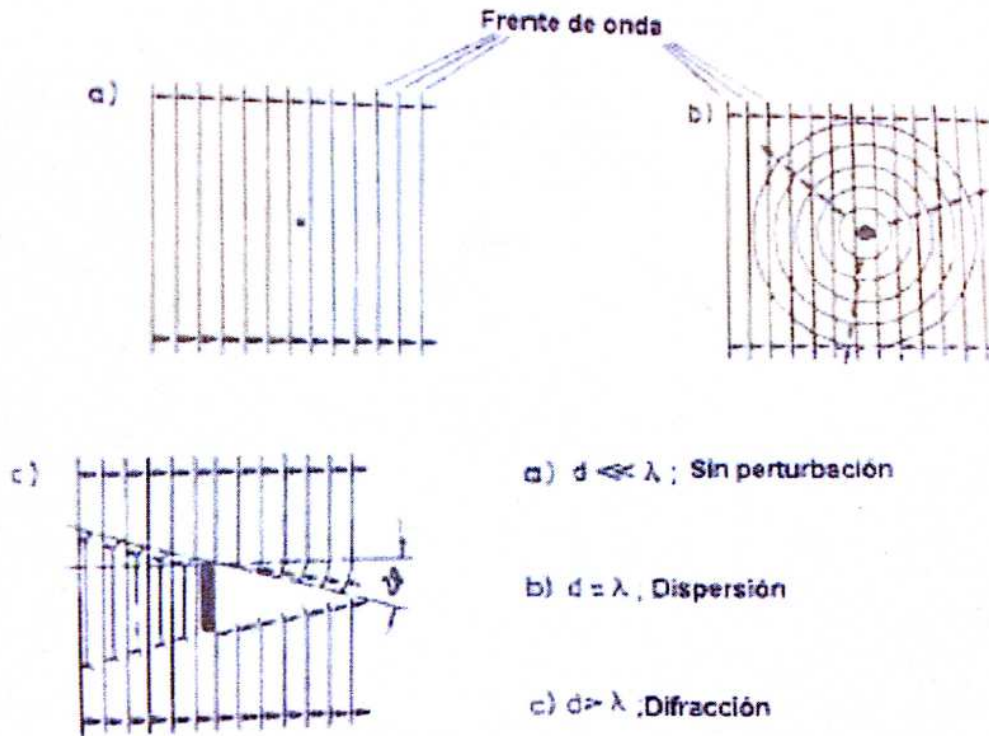


Figura 5.17 Dispersión y difracción de ondas en obstáculos

En a), el obstáculo es pequeño comparado con la longitud de onda y ésta viaja como si el obstáculo no estuviese presente.

En b), si el obstáculo es del mismo orden de magnitud que el de la longitud de onda, es el proceso de propagación es débilmente interferido, aunque algo de energía de la onda es absorbida. Esta energía se extenderá como una nueva onda esférica en todas direcciones, con el obstáculo como punto central. Este proceso es llamado dispersión.

En c), tenemos un obstáculo más grande que la longitud de onda, y si además asumimos que la impedancia acústica del obstáculo difiere mucho del de los alrededores, se producirá una reflexión de la onda en el mismo. En efecto, no habrá onda de propagación detrás de él (sombra de la onda), pero esta sombra será cada vez

menor con el incremento de la distancia desde el obstáculo. Este proceso es llamado difracción.

Hay aún otro fenómeno, la nueva onda reflejada se superpone con la original tal que dependiendo de las fases de ellas, se puede producir un refuerzo, un debilitamiento, o una completa anulación. Si la onda original tiene un máximo al mismo tiempo que la reflejada, las dos se sumarán. En cambio, puede ocurrir la desaparición cuando el máximo de una coincide con el mínimo de otra. Tal superposición se llama interferencia.

5.9.1.4 Disminución de la presión sónica

Al alejarse la onda sónica del transmisor, la presión sónica disminuye. Esta reducción tiene varias consecuencias:

- **Divergencia:** Un transmisor sónico emite el sonido no solamente en una dirección, sino en un rango angular. La sección transversal de haz se hace cada vez mayor con el incremento de la distancia, de modo que la energía se distribuye sobre un área cada vez mayor. De esta forma, la cantidad de energía sónica por unidad de área se va haciendo cada vez menor, tal y como se muestra en la figura 5.18.

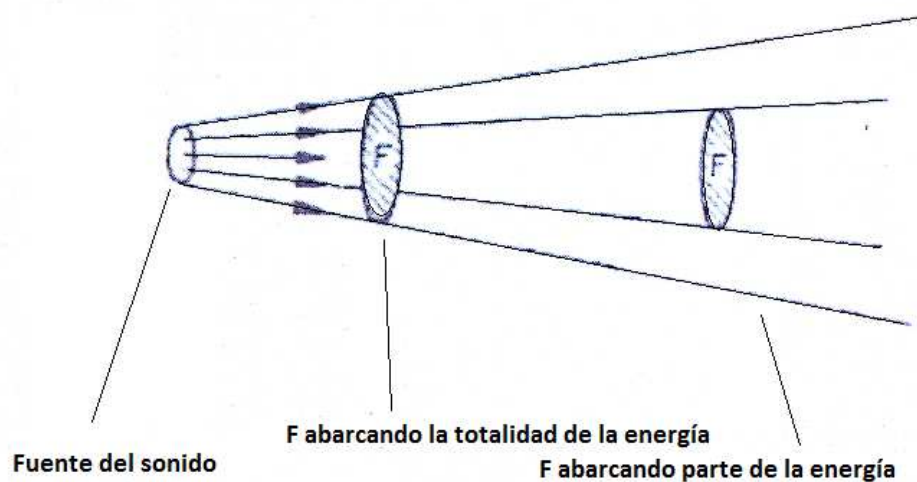


Figura 5.18 Reducción de la presión sónica causada por la divergencia

- **Atenuación del sonido:** El amortiguamiento o atenuación del sonido no es causado por la geometría de propagación, sino por las características del material. Fenómenos como la dispersión, o la absorción del material debido a las pérdidas de energía por fricción entre moléculas, son las causantes de ello. Además del material, la atenuación sónica también depende de la frecuencia y del tipo de onda.

La atenuación sónica se mide en decibelios (dB). Se define como:

$$a[db] = 20 \log \frac{U_1}{U_2}$$

donde:

- U_i son los voltajes eléctricos.
- a es la atenuación de la respuesta de ganancia.

Así, la altura de las indicaciones de los ecos en la pantalla del osciloscopio son proporcionales a los voltajes de los impulsos de los ecos, lo que puede ser escrito como:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{H_1}{H_2}$$

donde:

- H es la altura de eco.

Por tanto:

$$a[db] = 20 \log \frac{H_1}{H_2}$$

Si por ejemplo, $H_1/H_2 = 2$, encontramos: $a = 20 \cdot \log 2 = 6$ dB. Esto significa que una reducción de 6 dB en la altura del eco, corresponde a un decremento de la mitad de su altura.

5.9.2 Principios básicos de los instrumentos

El instrumental para la realización de los ensayos por ultrasonidos está en continua evolución, sin embargo los principios básicos de todos ellos son los similares.

5.9.2.1 Generación de ultrasonido

Existen un gran número de métodos para generar ultrasonidos, en principio sirven los mismos principios que se emplean para generar sonidos audibles, estos serían procedimientos mecánicos siempre y cuando se obtengan unas frecuencias propias elevadas. Este procedimiento sin embargo no suele ser usado en los ensayos no destructivos; recurriéndose a otros efectos como son el efecto magnetostrictivo y sobretodo el piezoeléctrico [25].

Los materiales ferromagnéticos, tienen la propiedad de contraerse o expandirse por efecto de un campo magnético. Inversamente si se somete al material a esfuerzos de tracción y compresión es capaz de generar un campo magnético. Este efecto es el magnetostrictivo, y se aprovecha para lograr altas potencias sonoras a relativa baja frecuencia.

Sin embargo, el efecto piezoeléctrico es el más utilizado y su importancia es mucho mayor, siendo aprovechado casi universalmente para el ensayo no destructivo de materiales. Ciertos cristales naturales o sintetizados tienen la propiedad de que en presencia de un esfuerzo de tracción o compresión se originan cargas eléctricas en la superficie, la carga cambia de signo si se invierte la dirección del esfuerzo. El efecto piezoeléctrico es reversible, es decir, cuando se aplica una carga eléctrica a la superficie de cristal, esta se contrae o se expande según el signo de la carga eléctrica. Una tensión eléctrica alterna, daría origen a oscilaciones mecánicas de presión.

De la reversibilidad se concluye que puede emplearse el mismo principio para generar y recibir ondas longitudinales ultrasónicas. En efecto, en la mayoría de los casos se utiliza un mismo cristal emisor y receptor.

El efecto piezoeléctrico no es propio de todos los cristales y solo se produce en determinadas condiciones. El ejemplo más conocido es el cuarzo. Otros ejemplos son los transductores cerámicos sintetizados que adquieren el efecto piezoeléctrico por polarización, alguno de los más importantes son el titanato de bario o el sulfato de litio.

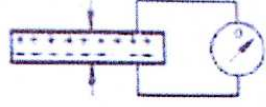
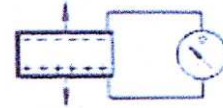

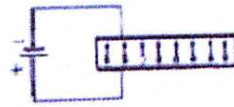
	Causa	Esquema	Efecto
Efecto piezoeléctrico directo	Compresión sobre el cristal		Voltaje positivo sobre las caras
	Tracción sobre el cristal		Voltaje negativo sobre las caras
Efecto piezoeléctrico inverso	Voltaje positivo sobre las caras		Expansión del cristal
	Voltaje negativo sobre las caras		Contracción del cristal

Tabla 5.1 Efecto piezoeléctrico del cuarzo

5.9.2.2 Procedimiento de ensayo ultrasónico

Existen básicamente dos procedimientos, basados en la evolución de la parte transmitida de la onda o de la parte reflejada de la misma, dependiendo de qué queramos estudiar utilizaremos un procedimiento u otro.

- **Procedimiento de transmisión:**

En este procedimiento se evalúa la parte del ultrasonido que ha sido transmitido a través de la pieza que se ensaya. A un lado de la pieza se aplica un emisor de sonido y al otro lado un receptor.

En presencia de un defecto, la intensidad sonora del receptor disminuye a causa de la reflexión parcial o se hace nula en caso de reflexión total (Figura 5.19). En este ensayo no se puede determinar la profundidad a la que está localizado el defecto de la pieza. Es necesaria una exacta alineación geométrica entre el emisor y el receptor [26].

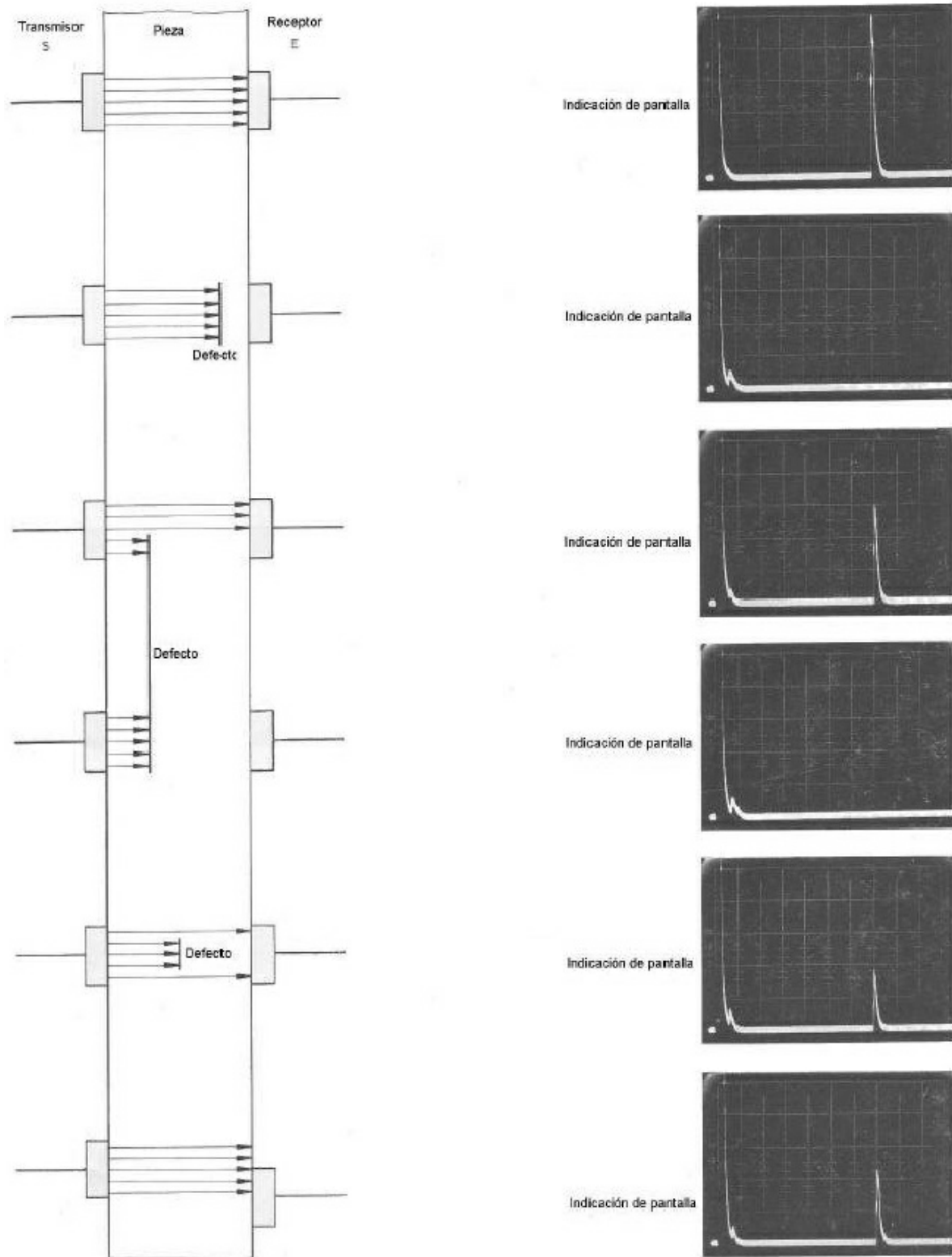


Figura 5.19 Método por transmisión

- **Procedimiento pulso-eco**

Este procedimiento utiliza la porción reflejada del sonido para la evaluación de defectos. El oscilador piezoeléctrico funciona a la vez como emisor y como receptor. La onda sonora penetra en el material, hasta que como resultado de una superficie límite, tiene lugar una reflexión parcial o total. Si la superficie reflectante se encuentra perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda sonora, ésta es reflejada en su dirección primitiva y al cabo de un tiempo determinado, que depende de la velocidad del sonido en el material objeto de ensayo y de la intensidad que existe entre el oscilador y la superficie reflectante, llega de vuelta al oscilador, siendo reconvertida en un impulso eléctrico.

No toda la energía que regresa es reconvertida en energía eléctrica, sino que en la interfaz entre el palpador y la superficie de la pieza tiene lugar de nuevo la reflexión parcial, una parte menor del sonido atraviesa por segunda vez la pieza y así sucesivamente, tal y como se aprecia en la figura 5.20 [26].

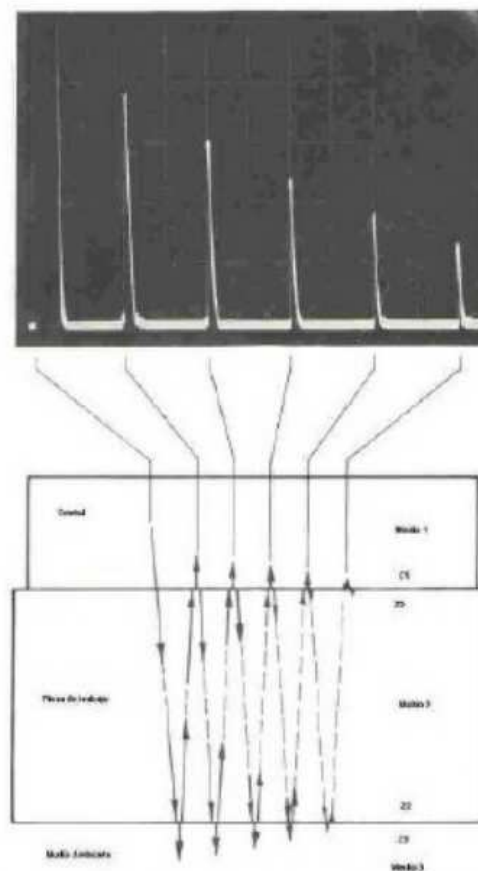


Figura 5.20 Formación de ecos múltiples

Debe tenerse en cuenta que no solamente el lado posterior determina ecos múltiple, sino cualquier otro reflector (defecto) que nos encontremos.

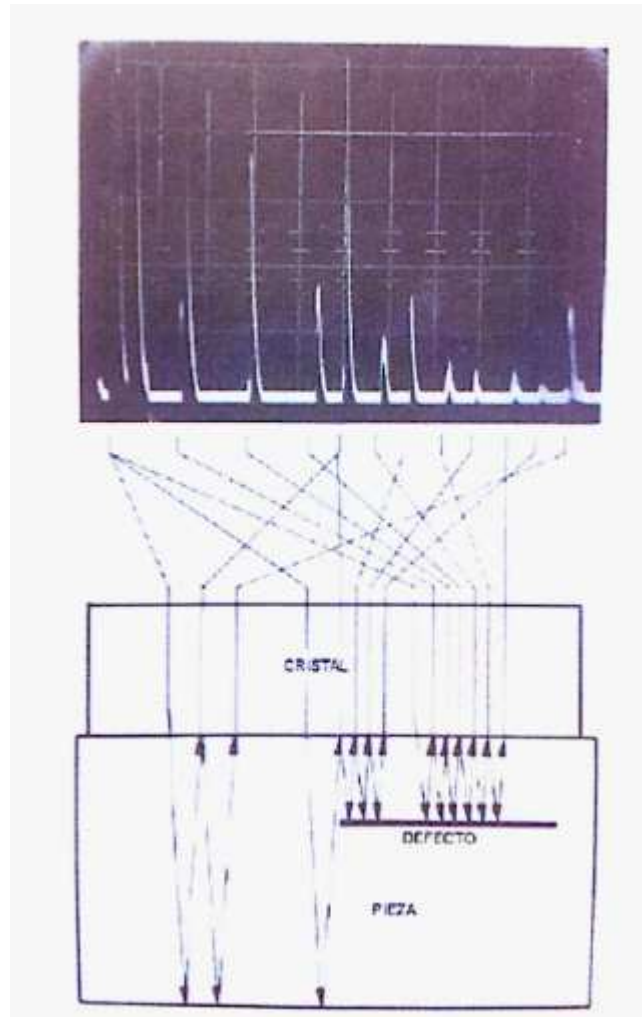


Figura 5.21 Ecos múltiples causados por el eco de fondo y un defecto

Precisamente este es el principio por el cual somos capaces de detectar fisuras y a que profundidad se encuentran.

5.9.2.3 Palpadores

Todos los palpadores utilizados en el ensayo de ultrasonido operan sobre la base del efecto piezoeléctrico. La oscilación del cristal recae lentamente en su propia frecuencia de resonancia como ocurre en el caso de una campana. Esta frecuencia propia surge para la oscilación fundamental, de la ecuación:

$$f_0 = \frac{C}{2d}$$

donde:

- f_0 es la frecuencia natural.
- C es la velocidad del sonido en el material transductor.
- d es el espesor del cristal.

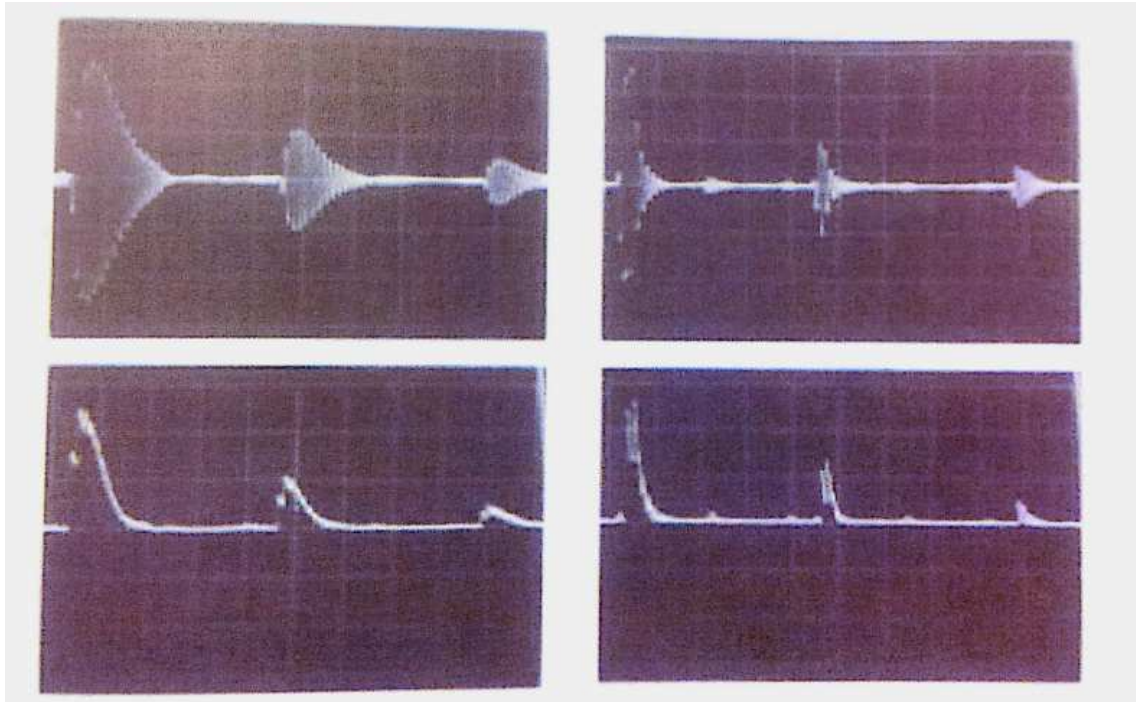


Figura 5.22 *Vibración de un cristal débilmente atenuado y otro fuertemente atenuado (arriba). La misma señal sobre la pantalla de TRC después de rectificado y filtrada (abajo)*

Ahora bien, como el procedimiento de pulso-eco el cristal debe tras un intervalo extremadamente corto funcionar otra vez como receptor, es preciso obtener en el menor tiempo posible la atenuación de la oscilación inductiva. Pero esta atenuación no deberá ser demasiado fuerte tal que reduzca pronunciadamente la sensibilidad del palpado. Desafortunadamente, el requisito de alta sensibilidad de respuesta y, al mismo tiempo pulsos estrechos dando alta resolución se oponen mutuamente.

El término de resolución designa la capacidad de respuesta del palpador, para dar indicaciones separadas de dos discontinuidades muy próximas entre sí, en forma claramente separados en la pantalla del osciloscopio.

En resumen, con un oscilador débilmente atenuado se obtiene una alta potencia y sensibilidad pero, a causa de lo ancho de los impulsos un menor grado de resolución. Con un oscilador fuertemente atenuado se obtiene una alta resolución (pulsos angostos) y potencia y sensibilidad decreciente.

Otro parámetro muy importante en la evaluación del tamaño de defectos es el campo sónico. Se conoce al campo sónico como el área influenciada por las vibraciones transmitidas por el palpador.

Cumpliendo con los principios físicos, el cristal transmite ondas ultrasónicas únicamente en sentido perpendicular a las superficies a las que se aplican cargas eléctricas, esto ocurre aproximadamente en forma de un haz de rayos paralelos, con una sección transversal correspondiente al diámetro del transductor para la primera parte de la propagación. A una cierta distancia del oscilador, el haz se abre en forma de cono.



Figura 5.23 Diagrama del haz ultrasónico

La intensidad del ultrasonido no es uniforme a lo largo del haz, debido al tamaño limitado de la fuente (oscilador), que da lugar a los efectos de la difracción. La zona muerta se debe a la interferencia producida por las vibraciones del cristal oscilador y su presencia en el haz y está determinada por el tiempo de oscilación. Recibe este nombre porque cualquier discontinuidad presente en esta, será totalmente ignorada durante el tiempo de oscilación del cristal, debido a que la presión acústica del haz es nula en toda su profundidad. En la proximidad al oscilador hay extensas fluctuaciones, ocasionando un campo con máximos y mínimos de presión acústica, es decir, un fenómeno de interferencia del campo ultrasónico conocido como campo próximo (zona cercana) o zona de Fresnel. Debido a las variaciones dentro del campo próximo, puede ser sumamente difícil evaluar con precisión las fallas que se encuentran en este sector de los materiales.

- **Palpador normal**

En nombre de palpador normal deriva de la dirección en que las ondas ultrasónicas viajan en la pieza. El cristal del transductor tiene metalizadas las caras para poder aplicarle pulsos eléctricos. Una de estas caras se pega al cuerpo amortiguador, la otra se puede acoplar directamente a la pieza a ensayar (cristal sin protección), o estar cubierta con una capa de material plástico o cerámico. Los alambres de conexión, soldados a las caras plateadas del cristal, suben pasando junto al cuerpo amortiguador hacia una pequeña bobina que realiza la adaptación eléctrica entre oscilador o el emisor de impulsos.

La unidad compuesta por el oscilador, el cuerpo amortiguador y la bobina es también llamada “Inserto” o “Nob”, y va alojada en una carcasa metálica puesta a tierra tal y como se muestra en la Figura 5.24 [27].

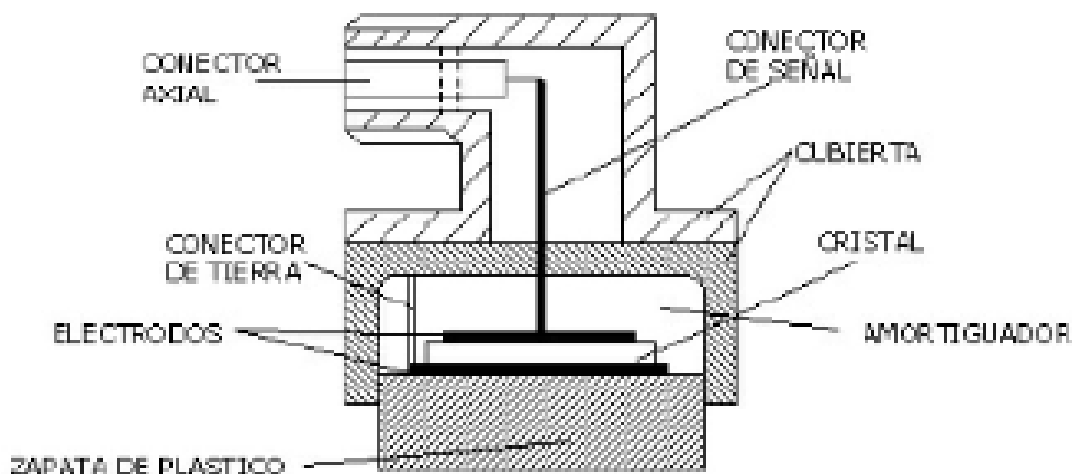


Figura 5.24 Corte de un palpador normal

- **Palpador de doble cristal**

La señal que recibe un equipo ultrasónico proveniente del impulso acústico o “eco” de emisión del ultrasonido (primer eco en la pantalla), que posteriormente es representada en la pantalla, genera una “zona muerta” para el palpador, en la cual no es posible detectar la presencia de discontinuidades, puesto que las indicaciones de los posibles defectos quedan enmascaradas. Para solucionar este inconveniente, se han diseñado los palpadores tipo E-R, cuyo

esquema aparece en la figura 5.25, que constan de dos cristales perfectamente aislados eléctrica y acústicamente por medio de una lámina de corcho de policloruro de vinilo.

Uno de los cristales actúa como emisor y el otro sólo como receptor, ambos cristales se montan, con una cierta inclinación sobre una columna de plástico que produce un efecto focalizador, concentrando el haz ultrasónico para conseguir la máxima sensibilidad en las proximidades de la superficie. Mediante este procedimiento, se consigue que por efecto del trayecto en el plástico, la indicación de la señal de emisión quede muy separada de la indicación del eco de cualquier discontinuidad [27].

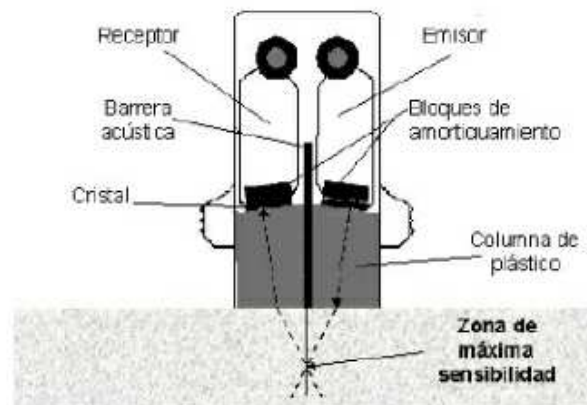


Figura 5.25 Palpador de doble cristal tipo E-R

- **Palpadores normales de ondas transversales**

La construcción de estos palpadores es igual a la de los palpadores normales de ondas longitudinales. Solamente, el transductor en sí mismo, tiene una orientación cristalográfica diferente y por ello genera vibraciones cortantes. Es necesario el uso de acoplantes rígidos ya que se había comentado que los líquidos no son capaces de transmitir ondas transversales [10].

- **Palpador angular**

Los palpadores angulares de contacto constan en esencia de un oscilador, generalmente, de ondas transversales aplicado a una de las caras de un prisma plástico (ver figura 5.26), tallado con un ángulo de incidencia adecuado al

ángulo de refracción o de penetración que se desea para un material dado de muestra de ensayo [27].

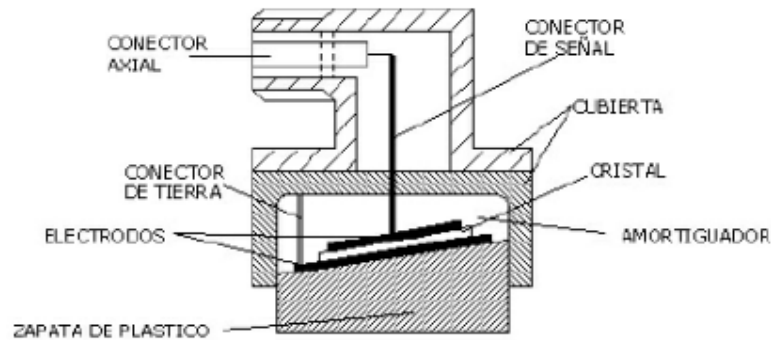


Figura 5.26 Corte de un palpador angular

- **Palpador de inmersión**

Los ensayos por inmersión, bien sumergiendo la muestra en un tanque o mediante el empleo de palpadores de inmersión local, son particularmente indicados cuando se precisa realizar exploraciones de gran volumen y extensión, examinar lotes de gran número de muestras o muestras de formas relativamente complejas. Como la transmisión del ultrasonido desde el palpador hasta la muestra, se efectúa a través de una columna de líquido, es decir sin contacto directo, presión ni rozamiento entre el palpador y la muestra, esto permite:

- Eliminar los riesgos de rotura y desgaste del cristal oscilador, por lo que no se precisa el uso de alguna suela protectora.
- Emplear frecuencias más elevadas (cristales de espesor más fino) que las posibles con los palpadores de contacto, ya que el riesgo de rotura de los cristales es mínimo.
- Propagar el haz ultrasónico en la muestra con el ángulo de penetración deseado, pudiéndose variar la inclinación del palpador con relación a la superficie de la muestra de forma continua.
- Aumentar la velocidad del ensayo, al no haber contacto o rozamiento, por lo que los ensayos por inmersión están especialmente indicados para ensayos automáticos o semiautomáticos

5.9.2.4 Sistemas de representación

Hay tres tipos básicos de representación de pantallas de TRC para ensayos ultrasónicos:

- **Representación “Tipo A”**

Es el más extendido y es el de representación en un tubo de rayos catódicos (TRC) en el que las indicaciones aparecen como deflexiones verticales en la base de tiempo, es decir, en la pantalla se representa el tiempo en escala horizontal y la amplitud en la escala vertical. La representación tipo A, se discrimina de izquierda a derecha.

La altura de los ecos pueden ser comparadas con la altura de un eco proveniente de un deflector de referencia conocido, a fin de tener una referencia del tamaño de la indicación [27].

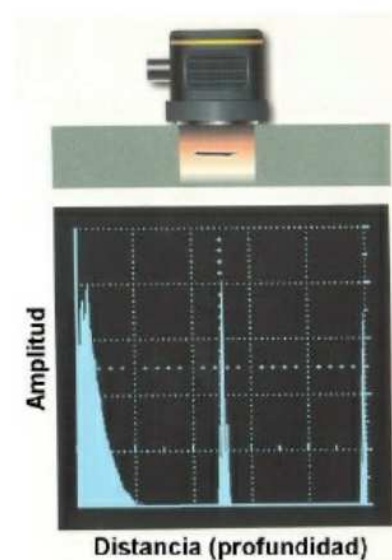


Figura 5.27 Representación Tipo A

- **Representación “Tipo B”**

La representación tipo B, usa una pantalla de osciloscopio típica que muestra una vista de una sección transversal del material a ser ensayado. La imagen es retenida sobre el TRC el tiempo necesario para evaluar la pieza y para fotografiar la pantalla, con objeto de obtener un registro permanente [27].

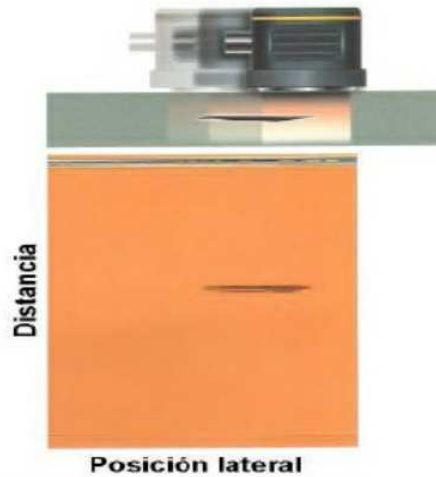


Figura 5.28 Representación Tipo B

- **Representación “Tipo C”**

Se representa una vista plana, similar a una placa radiográfica. Además muestra la forma y localización de la discontinuidad, pero no su profundidad [27].

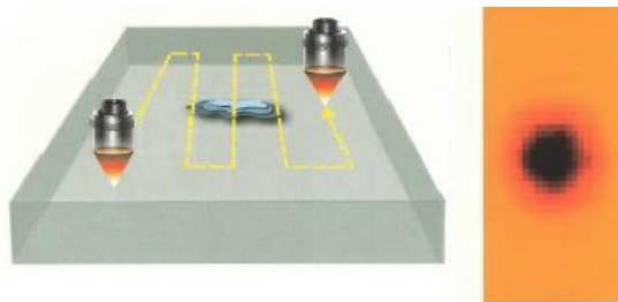


Figura 5.29 Representación Tipo C

5.9.2.5 Interpretación de la representación Tipo A

La figura 5.30 reproduce los oscilogramas que se obtienen para los diversos ejemplos mostrados de detección de discontinuidades. Se comprueba cómo, además de detectar pequeñas heterogeneidades, se puede determinar a la vez la posición de estas, lo cual presenta un avance decisivo para la mayoría de las aplicaciones [27]:

- Si las discontinuidades son pequeñas en comparación con la sección del haz, se obtiene, simultáneamente con la indicación de su eco, la del eco de fondo de la muestra (figura 5.30a).
- Si se presentan varias discontinuidades a diferentes distancias, se pueden obtener indicaciones de ecos independientes (figura 5.30b), siempre que las

discontinuidades más próximas al palpador no “oculten” a las que están más alejadas.

- Si la heterogeneidad presenta una superficie capaz de interceptar todo el haz, no se obtendrá indicación del eco de fondo, ni de las otras discontinuidades más alejadas (figura 5.30c).
- Cuando la discontinuidad se presenta inclinada respecto al haz ultrasónico (figura 5.30d) y además intercepta todo el haz, no se obtiene indicación del eco de fondo ni de la discontinuidad.
- La indicación del eco de fondo puede desaparecer, también, por el efecto de la falta de paralelismo de las caras de la muestra (figura 5.30e) o por una elevada atenuación al interior del material.
- Los estados de microporosidad, entre otros, provocan la dispersión del haz ultrasónico, obteniéndose representaciones como la de la figura 5.30f, caracterizadas por la presencia de una elevada dispersión, en la cual no se puede diferenciar ninguna indicación.
- Si la muestra tiene superficies paralelas, pueden aparecer en la pantalla varias indicaciones de las sucesivas indicaciones de fondo, obteniéndose un oscilograma de “ecos múltiples” como el de la figura 5.30g.

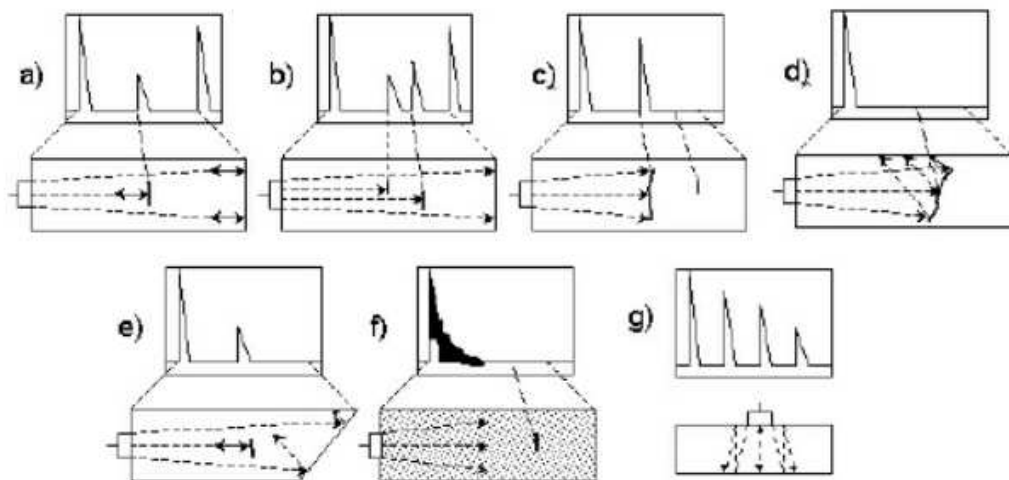


Figura 5.30 Influencia de la orientación de los defectos

5.9.3 Procedimientos generales del ensayo ultrasónico

En muchos casos, el defecto de la pieza es conocido o puede ser estimado de una forma más o menos fiable. Este estudio es importante realizarlo, ya que evitará muchos problemas a la hora de tomar decisiones sobre el procedimiento y los parámetros más adecuados. Por ejemplo, podremos saber a priori cual es la dirección que tiene que tomar el haz para la detección del defecto, o la zona de la pieza que más posibilidades tiene de poseer el defecto. Sin embargo, en todos los casos se deben seguir unos consejos básicos que faciliten la tarea. A continuación se enumeran alguno de ellos que es recomendable tener en cuenta:

- Los defectos planos serán detectados perpendicularmente: técnica de ensayo simple y fácil de inspeccionar con un palpador.
- Relacionado a la superficie de la parte bajo ensayo: en muchos casos el uso de palpadores normales (verticales) es más simple que el de los palpadores angulares, por lo que se los preferirá.
- En lo posible se usará un camino sónico recto sin cambios de dirección dentro de la pieza.
- Serán más favorables las técnicas de ensayos con un solo palpador a poder ser, que una combinación de ellos en una geometría compleja.
- Darán mayor seguridad y confianza los ensayos en los cuales aparezca un eco de referencia en el fondo del rango de ensayo (por ejemplo pared posterior o eco de un borde).
- Por razones económicas, el volumen de la pieza a ensayar será el mayor posible, al mismo tiempo que el área de inspección lo más pequeña que se pueda.
- Cuando la orientación del plano de un defecto es desconocido, el ensayo deberá llevarse a cabo desde distintos sitios de la superficie.
- El método de transmisión será usado solo cuando el método de pulso-eco falle.

5.9.4 Ventajas y limitaciones

- **Ventajas**
 - Puede detectar gran variedad de defectos.
 - Puede determinar la profundidad y estimar el tamaño y la forma del defecto.
 - Unidades portátiles.
 - Requiere acceso a una superficie únicamente
 - Las piezas con geometrías sencillas son fáciles de examinar.
 - Ausencia de peligro para el trabajador.

- **Limitaciones**
 - Dificultad en la inspección de espesores finos.
 - Problemas con materiales de grano grueso o materiales bifásicos.
 - Superficies curvas enfocan o desenfocan el haz.
 - No se puede inspeccionar materiales con elevada porosidad.

5.10 MÉTODOS USADOS ACTUALMENTE

A continuación se estudiará algunos de los métodos de ensayos no destructivos que usan las principales empresas ferroviarias así como métodos para situaciones especiales que se han desarrollado.

5.10.1 Método “Phased Array”

Un palpador *Phased array* es un grupo de palpadores muy pequeños rectangulares contiguos en un solo alojamiento. Es típico usar 128 elementos de unos 76 a 102 mm. El circuito generado puede, por ejemplo, conectar los elementos del 1 al 4 y hacer que estos elementos emitan unidos, moviendo después los elementos activos un elemento, conectando los elementos del 2 al 5. De esta manera se consigue un escaneado electrónico. Es escaneado electrónico usando *Phased array* lineales reduce considerablemente el tiempo de inspección para elementos en los que no sea necesario cambiar la ley focal o la dirección de los haces. Cada elemento individual tiene su propio circuito de emisión de pulso y recepción. Todos los elementos están conectados

y controlados por un sistema de ultrasonidos informatizado que es capaz de activar cada elemento independientemente. De esta manera se pueden crear diferentes formas de ondas, cambiando la ley focal, dirigiendo y focalizando al mismo tiempo. *Los Phased array* son palpadores divididos en pequeñas áreas, de manera que puedan ser disparados de manera electrónica para focalizar precisamente y guiar los haces ultrasónicos en la dirección elegida. Esta solución permite la detección de defectos más pequeños que los que se captarían con un palpador individual largo por la sensibilidad direccional de los elementos pequeños y por la capacidad de focalizar los haces en áreas específicas.

Las principales ventajas de usar este método frente a otros más tradicionales son su flexibilidad, mejora la capacidad de detección de defectos, mayor cobertura volumétrica, reducción de la razón señal ruido, facilidad de calibración y de realización de ensayo, bajo mantenimiento y capacidad de adquisición de datos. Además, mejora la velocidad de inspección comparado con la inspección manual y menor complejidad comparada con las inspecciones automáticas. Permite variar rápidamente la configuración para diferentes diseños de ruedas, permite llevar a cabo múltiples escaneados durante una inspección y puede realizar inspecciones especiales [2].

5.10.2 Sistema desarrollado en Australia para la Hamersley Iron Railways

En Australia se ha desarrollado un sistema para la compañía Hamersley Iron Railways capaz de detectar grietas en los vagones que transportan minerales. Entre las condiciones tan adversas que hay en Australia (cambios climáticos severos con variaciones extremas de la temperatura), las cargas que soportan los vagones y la longitud de los trenes (considerándose uno de los trenes más pesados y largos del mundo) se ha descubierto un gran número de grietas en las ruedas que, por supuesto, reduce la seguridad de los mismos y aumentan los costes de mantenimiento. Además de grietas de unos 17 mm en dirección axial, se han encontrado fisuras en el límite inferior del extremo de la llanta o zona central de la llanta (aproximándose a agujeros de 1 mm de diámetro).

El sistema usa un mecanismo que hace girar las ruedas de los trenes mientras el palpador permanece fijo. Inicialmente se usaron frecuencias de 2.25 MHz, pero dándose cuenta del coste que suponía comenzaron a usar frecuencias de 5 MHz.

La inspección se realiza mediante una máquina específica desarrollada por la compañía que contiene un palpador de ultrasonidos *Phased array* configurado para detectar y dar el tamaño de las discontinuidades. El proceso está automatizado y lleva alrededor de 15 minutos. Los defectos de *shelling* son localizados y medidos en términos de longitud circunferencial y profundidad bajo la banda de rodadura y se da un valor de severidad dependiendo del diámetro de la rueda y el número, tamaño y distribución de los defectos. Los resultados se guardan en una base de datos para un posterior estudio del comportamiento y el crecimiento de grietas en rueda. El sistema es capaz de detectar grietas de hasta 1 mm, por lo que se señaló que el máximo valor permitido para un defecto sería ese milímetro [2].

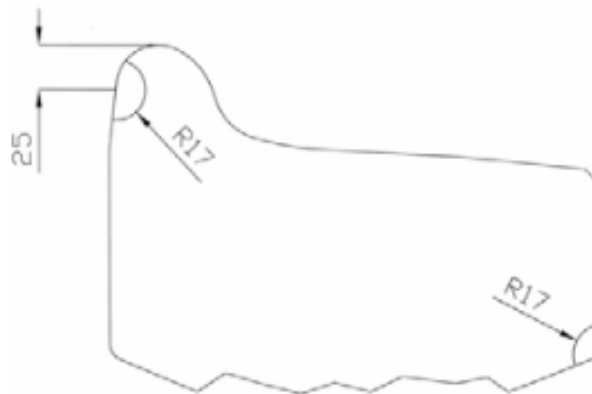


Figura5.31 Zonas de localización de grietas en la empresa Hamersley Iron Pty Ltd en Australia

5.10.3 Sistema utilizado por la SNCF para las ruedas del TGV

La SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer) utiliza un banco de ultrasonidos capaz de inspeccionar las 4 ruedas de un *bogie* en un tiempo máximo de 6 minutos, siendo el tiempo de inspección de unos dos minutos y medio.

Se buscan defectos de fatiga paralelos a la banda de rodadura. El examen se efectúa según la técnica de pulso-eco con ondas longitudinales. La inspección se realiza

en inmersión. Para calibrar el equipo se utiliza una llanta con defectos tipo FBH (Flat BottomHole) de 3 mm de diámetro [2].

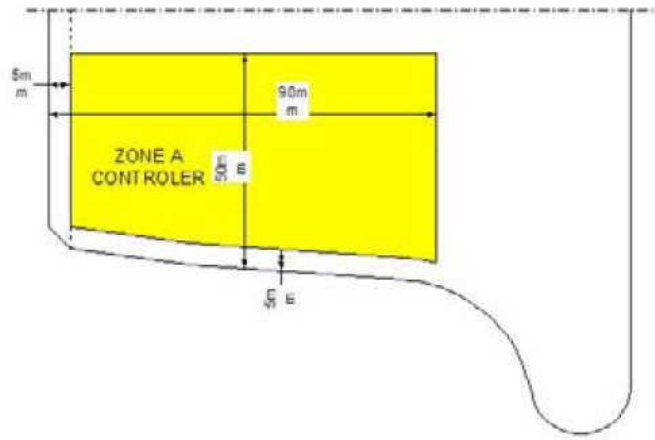


Figura 5.32 Zonas a controlar según normativas internas de la SNCF

5.10.4 Sistema utilizado por la Deutsche Bahn para las ruedas del ICE

Actualmente, las llantas y velos de los trenes ICE se inspeccionan cada 250.000 km. Para realizar esta inspección de manera semi-automática y fiable, se usa el sistema SUPRA que inspecciona 64 ruedas en aproximadamente una hora, haciendo pasar el tren por la instalación. La velocidad de inspección es de 1 km/h y para mover los palpadores (tecnología *Phased array*) de rueda a rueda se utiliza un robot [2].

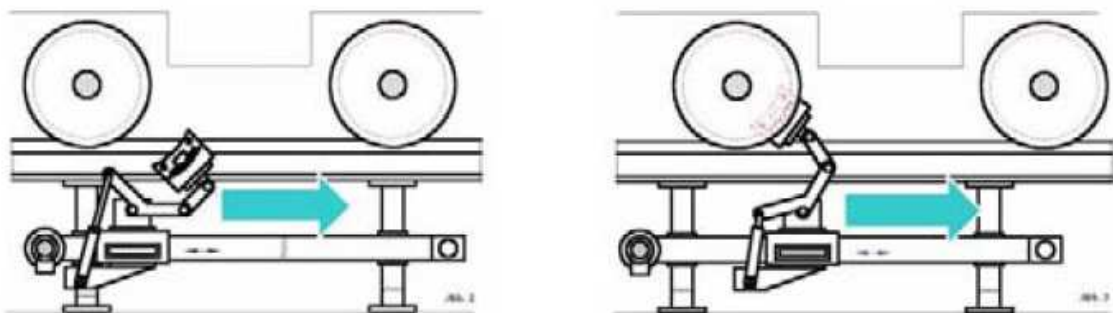


Figura 5.33 Robot utilizado para acoplar los palpadores a las ruedas ICE en el taller de Berlín-Rummelsburg

5.10.5 Sistema utilizado en torno de foso (Eurostar)

Este sistema lleva a cabo una inspección ultrasónica automatizada de las ruedas del tren Eurostar. En los talleres de mantenimiento, el torno de foso existente se utiliza para realizar el trabajo de desplazar el palpador ultrasónico sobre la rueda, con la electrónica y el software realizando la inspección.

Este sistema incluye un palpador de inspección que está montado en el puesto de las herramientas del torno de foso. El palpador utiliza un seguidor de contacto que es capaz de desplazarse para seguir el perfil de la superficie de rodadura de la rueda de modo que el desgaste de la superficie de rodadura no afecte al resultado.

La rueda gira 20 veces durante la inspección, lo que significa que dura un total de 2 o 4 minutos. El tiempo para realizar una calibración son unos 40 minutos [2].

5.10.6 Sistemas de ultrasonidos para inspeccionar ruedas tras el torneado (sistema desarrollado por la empresa Union Pacific Railroad)

El requerimiento es la inspección de ruedas recién torneadas, montadas en sus ejes para buscar defectos internos y superficiales en la zona de la llanta. Se deberán detectar tanto grietas térmicas como defectos internos en la zona de la llanta.

Este sistema pasa por el uso de palpadores *Phased array* de ultrasonidos. Estos palpadores están fijos, montados en un tanque de agua en el cual el eje será izado y girará alrededor de unos rodillos cerca de los palpadores. Esta tecnología se utiliza para mejorar la detectabilidad de pequeños defectos en sus inicios, focalizando el escaneado en la zona de la llanta. El sistema utiliza dos palpadores *Phased array* y cuatro fijos para cada rueda. Los dos *Phased array* se usan para inspeccionar el área central de la llanta, uno próximo a la banda de rodadura y el otro en la cara interna para cubrir toda el área de la llanta y llevar a cabo un escaneado multifocal mientras las ruedas giran. La focalización da mejor sensibilidad a los defectos y mejor resolución en la superficie cercana.

Las grietas térmicas en la llanta, banda de rodadura y zona de paso de la banda de rodadura a la pestaña se detectan utilizando tres palpadores. El palpador A es común a todos los ensayos y sirve como transmisor y receptor. Para la detección de las grietas

térmicas en la zona de la pestaña se utiliza un palpador fijo, posicionado bajo la llanta y capaz de generar una onda superficial. Los defectos detectados por este palpador deberán ser verificados mediante una inspección local por partículas magnéticas [2].

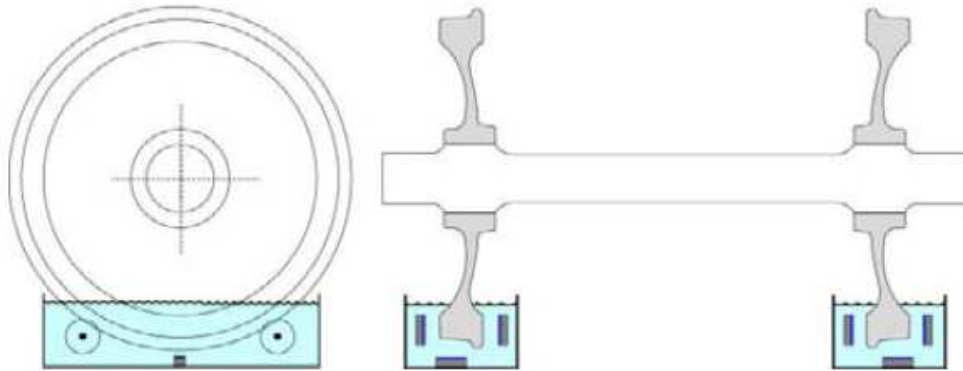


Figura 5.34 Posición de los palpadores y de la cubeta de inspección

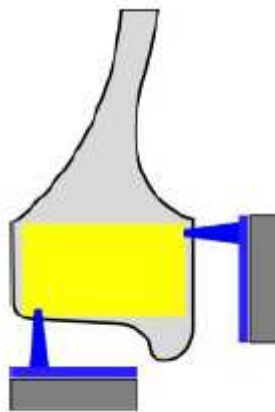


Figura 5.35 Inspección de la zona de llanta

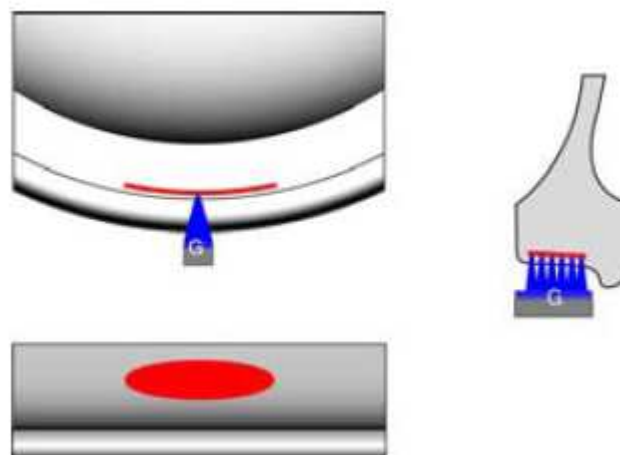


Figura 5.36 Inspección en busca de defectos "shattering"

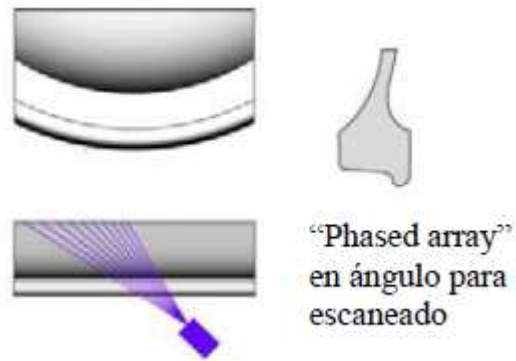


Figura 5.37 Inspección en busca de grietas térmicas en la zona exterior

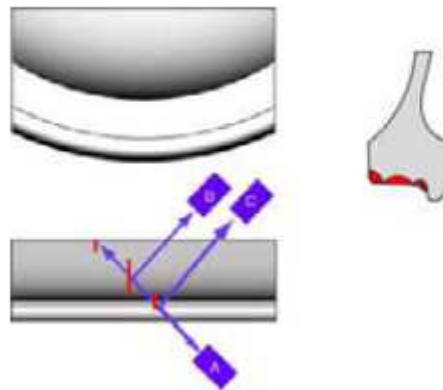


Figura 5.38 Inspección en busca de grietas térmicas en la banda de rodadura

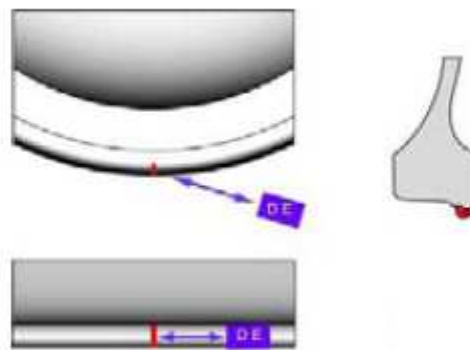


Figura 5.39 Inspección en busca de grietas térmicas en la pestaña

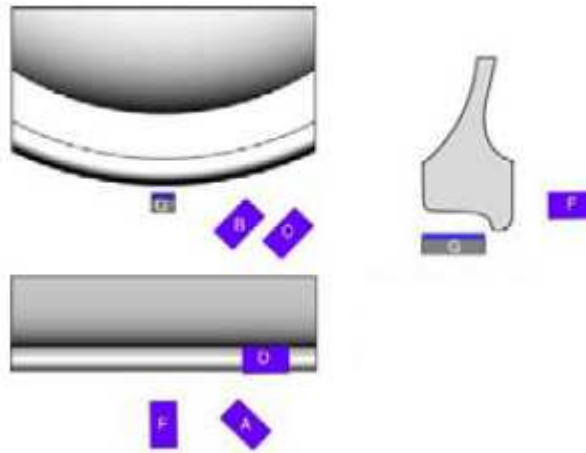


Figura 5.40 Vista general de palpadores

5.10.7 Sistema utilizado por Renfe para la inspección del velo

Se trata de un equipo de ultrasonidos de 6 canales con ganancia, retardo y campo programable independiente para cada canal. Se utilizan dos subconjuntos de tres palpadores de 5 MHz y 20 mm de diámetro (un subconjunto para la inspección de las ruedas a cada lado del tren). De estos tres palpadores uno tiene orientación radial, y los otro dos, orientación angular, de modo que se garantice la cobertura total de la periferia de los taladros.

Se utiliza un conjunto mecánico controlado por el sistema de ultrasonidos que levanta el eje cuyas ruedas se van a inspeccionar y las hace girar [2].

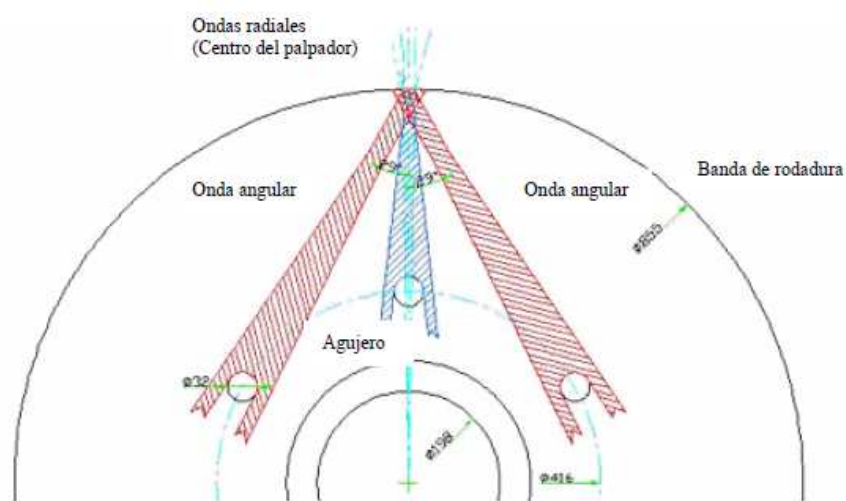


Figura 5.41 Posicionamiento de los palpadores para la completa detección de grietas en el velo

5.10.8 Sistemas EMATs

En Europa se usan sistemas que incluyen palpadores electromagnéticos acústicos (EMATs). Se trata de un método que introduce ondas superficiales (ondas de Rayleigh) en las ruedas, que viajan a lo largo de la superficie de la misma.

Se sitúa un segundo palpador opuesto al primero que manda ondas que se reflejan en dirección opuesta a las primeras. Si la onda se encuentra un defecto en la superficie, parte de la energía es reflejada, siendo recibida de nuevo por el palpador.

Las ondas superficiales pueden tener algún inconveniente, ya que al viajar a través de la superficie, cualquier irregularidad en la misma provocada por suciedad puede producir una señal. Solo detecta defectos en la superficie [2].

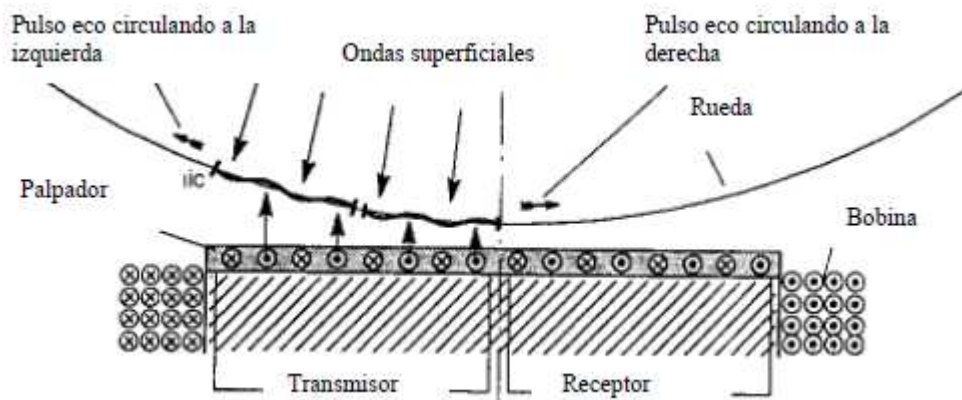


Figura 5.42 Posición de los palpadores EMATs

5.10.9 Sistemas que miden el campo de tensiones residual

Las ruedas nuevas tienen un campo residual de tensiones a compresión debido a su proceso de fabricación. Las tensiones tras el tratamiento térmico se distribuyen dando el máximo próximo a la superficie y tendiendo a cero a medida que nos acercamos a la transición llanta-velo. La operación del temple tiende a igualar la estructura y las tensiones; aunque la distribución y el valor de esas tensiones dependen de la forma de la rueda y en especial del velo de la misma.

Las tensiones residuales tienen una componente radial y otra axial, muy pequeñas, siendo la componente circunferencial la de mayor relevancia.

Posteriormente, las ruedas soportan una serie de solicitaciones permanentes o periódicas, que modifican dicho campo residual de tensiones, como son el calado, carga vertical debido al peso, esfuerzos laterales de interacción con la vía y esfuerzos derivados del campo térmico producido después de una frenada. Estos esfuerzos se superpondrán.

Las tensiones tractivas mayores se desarrollan en el área entre la zona de contacto y la cara exterior de la llanta. Como consecuencia del daño de esta región y de la deformación plástica sufrida, resulta difícil obtener un equipo que analice las tensiones automáticamente.

Un cambio en las tensiones del material resulta en un cambio en la velocidad de paso de las ondas ultrasónicas a través del mismo. La diferencia en la velocidad de la onda en las direcciones radial y circunferencial permite calcular el estado de tensiones de la llanta. Este método no permite conocer la tensión circunferencial directamente, si bien esta desventaja se ve compensada por:

- La onda transversal es generada por un palpador electromagnético tipo EMAT, no necesitándose acoplamiento.
- La influencia de la temperatura es despreciable.
- Se evalúa la diferencia entre las tensiones tangencial y radial.

La dirección de propagación de las grietas tiene también componentes perpendiculares a la dirección radial, de manera que la diferencia de tensiones es un valor más apropiado para la evaluación de la mecánica de fractura [2].

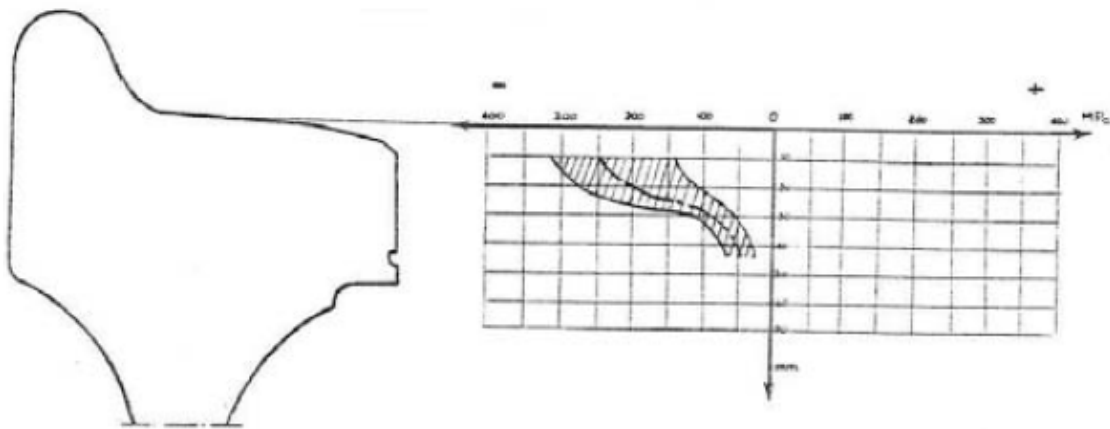


Figura 5.43 Medida de las tensiones de una rueda nueva

5.10.10 Sistemas de ultrasonidos para ruedas nuevas

Los defectos en la fabricación pueden producirse durante el proceso de baño metálico, el fundido, proceso de plastificación en caliente o durante la fase de tratamiento térmico. La inspección de ruedas nuevas tiene la ventaja de que se conoce el perfil de la superficie.

Para la inspección se usan dos palpadores de *Phased array* con 128 elementos cada uno, colocándose uno de ellos en la banda de rodadura y el otro en un lateral. Inspeccionando desde los dos sentidos se asegura que cualquier defecto sea detectado, independientemente de su orientación. La frecuencia usada son 5 MHz y se activan cada vez 16 elementos. La inspección se realiza por inmersión usando como acoplante agua, haciendo girar la rueda mediante un rodillo metálico [2].

5.11 INSPECCIÓN DE DISCONTINUIDADES EN BANDA DE RODADURA EN RUEDAS CIVIA

En este apartado se recoge la técnica empleada por la empresa CAF (Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles) que es la encargada de la inspección de ruedas Civia para Renfe [16]. El método que se va a describir a continuación es utilizado para la detección de fisuras subsuperficiales en la banda de rodadura, y no para otras partes de la rueda.

La sistemática de inspecciones en ruedas viene definida en la instrucción IV-UT-CIVIA-02 Ed.b y debe servir de referencia a la hora de parametrizar los equipos como las zonas a inspeccionar. Las medidas de seguridad serán de obligada aplicación, estas se recogen en el plan de Prevención de Riesgos Laborales de cada compañía.

5.11.1 Equipos y materiales

El estado de los equipos utilizados para la inspección debe estar en correcto estado de conservación, así como cumplir con los requisitos aplicables de calibración.

- Equipo utilizado:
 - Aparato de impulso-eco con mando de ganancia tarado en dB.
 - Capaz de trabajar en banda de frecuencia de 4MHz.

- Calibrado en linealidad vertical y horizontal.
- Palpador:
 - Palpador recto bicristal MSEB-4 de Ø 10mm y 4MHz.
- Cable:
 - Tipo coaxial, adecuados para la interconexión de los equipos.

5.11.2 Gráficas de referencia

En este apartado se muestran las gráficas realizadas con los instrumentos que se acaban de mencionar. Estas gráficas representan a un reflector artificial de Ø 3mm a distintas profundidades. Con esto se intenta ver de una forma gráfica y práctica la interpretación de un reflector visualizado en pantalla, además puede servir como imágenes de referencia a la hora de estimar otro tipo de reflectores.

Todas las gráficas están referenciadas a 45 dB, y en un campo de 100 mm (recuadro rojo). La modificación del campo de visualización no afecta a la ATP (altura total en pantalla) de reflector, en cambio cualquier variación de la ganancia en dB si afecta a la visualización/comparación de la ATP del reflecto con la gráfica de referencia.

En la gráfica se identifica el método utilizado para obtener el reflector, mediante pieza patrón del mismo material de la rueda, a la cual se le ha realizado las entallas de profundidad.

El resto de ecos aparecidos en el gráfico y no referenciados, son productos de ecos posteriores al principal, así como a ecos geométricos provocados por la pieza patrón.

- Reflector de $\varnothing 3\text{mm}$ a 21 mm de profundidad

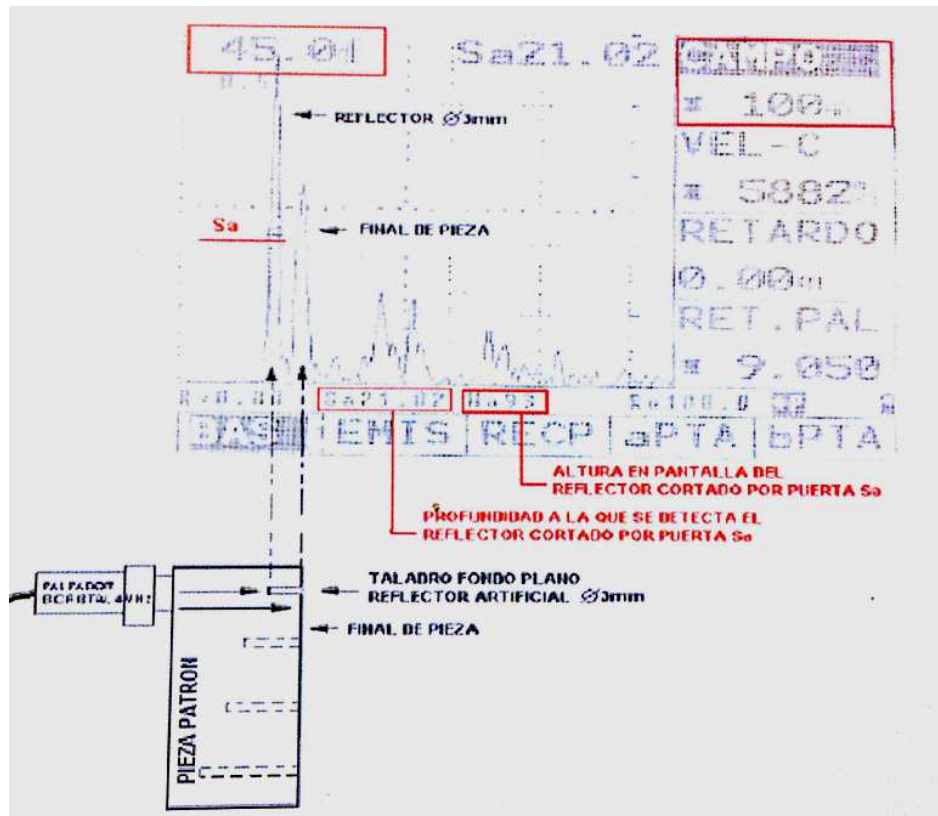


Figura 5.44 Reflector de $\varnothing 3\text{mm}$ a 21 mm de profundidad

- Reflector de $\varnothing 3\text{mm}$ 16 mm de profundidad

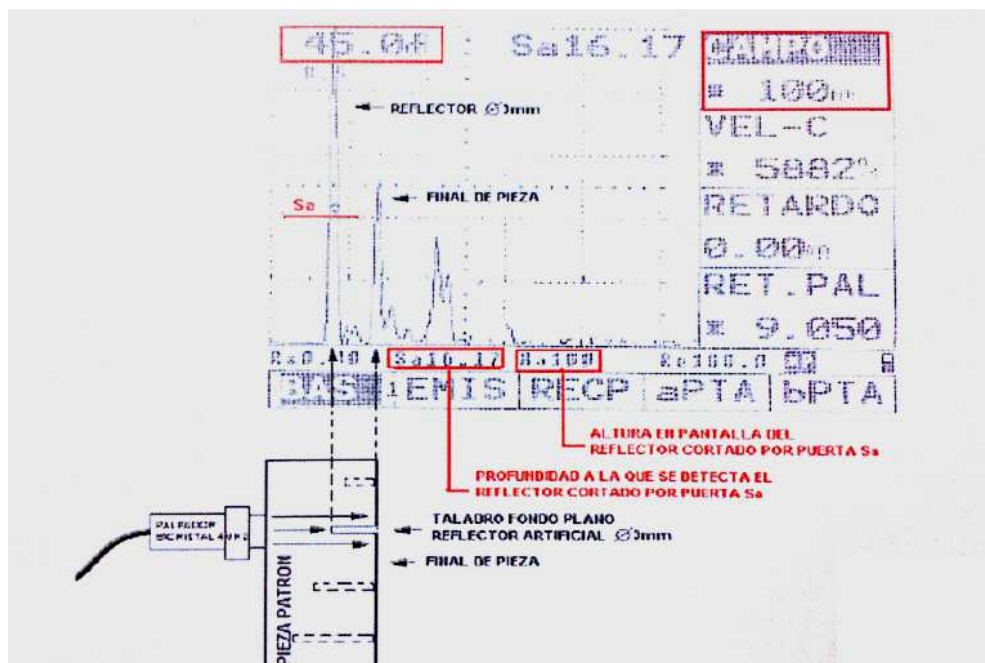


Figura 5.45 Reflector de $\varnothing 3\text{mm}$ a 16 mm de profundidad

- Reflector de $\varnothing 3\text{mm}$ 11 mm de profundidad

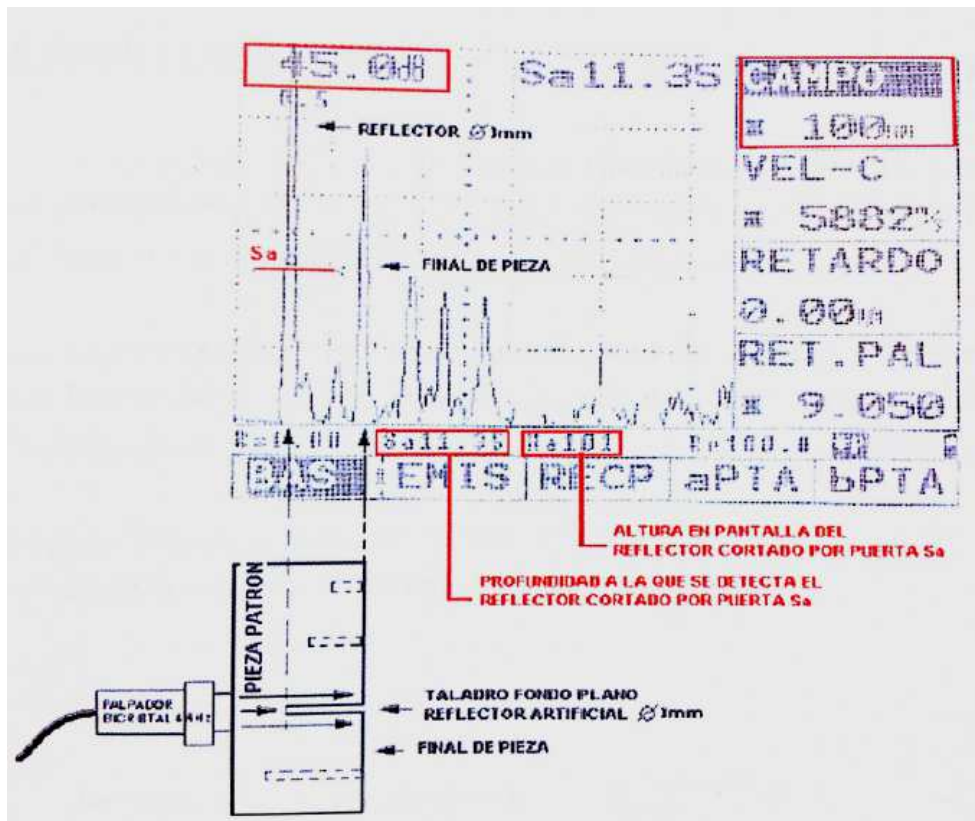


Figura 5.46 Reflector de $\varnothing 3\text{mm}$ a 11 mm de profundidad

- Reflector de $\varnothing 3\text{mm}$ 6 mm de profundidad

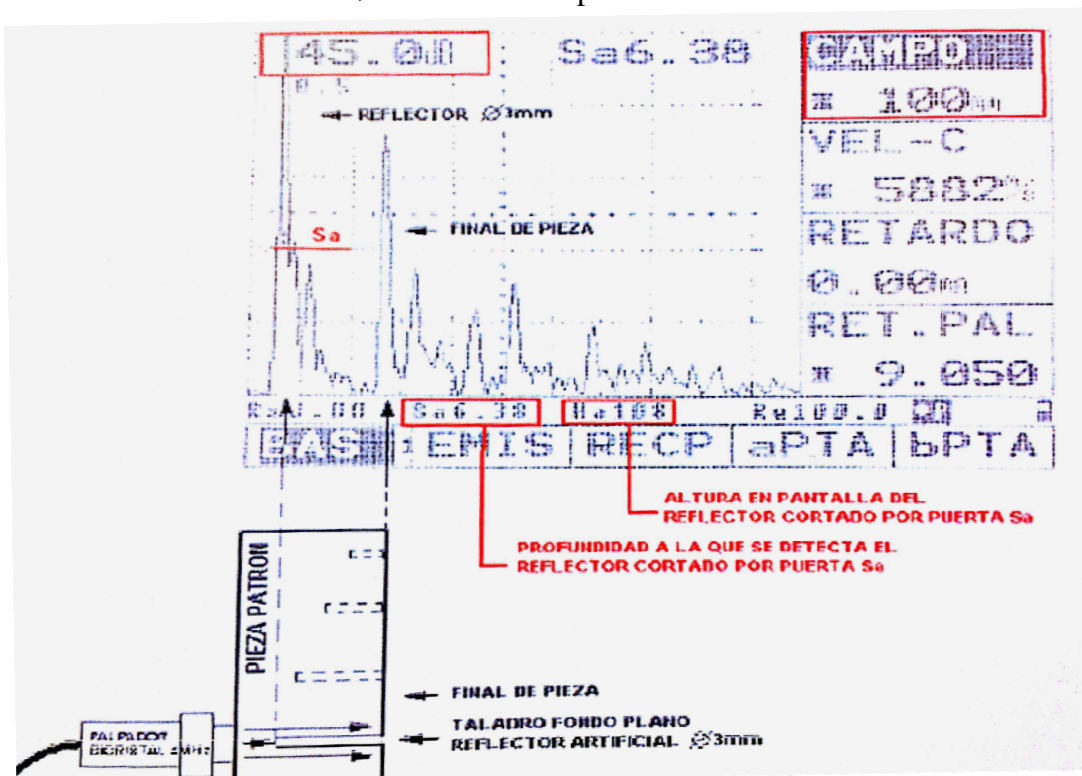


Figura 5.47 Reflector de $\varnothing 3\text{mm}$ a 6 mm de profundidad

5.11.3 Método de medición de discontinuidades

Se utiliza la técnica de caída de 6dB, también llamada eco máximo y eco mitad. Se basa en el principio de que cuando el eje del haz es tangente al borde de la discontinuidad, la amplitud de la señal disminuirá al 50% de su altura inicial (ver epígrafe 5.9.1.4).

Esta técnica es aconsejable en discontinuidades paralelas al perfil de la banda de rodadura (las más comunes), para el caso de discontinuidades con trazas diferentes habrá que delimitarla desde distintas proyecciones.

El procedimiento a seguir se describe en los siguientes pasos:

1. Una vez detectada la discontinuidad, se localiza el punto de mayor altura de reflexión. En el caso que se salga de la pantalla, se actúa sobre el mando de ganancia hasta fijarlo a una determinada altura, en este caso del 80% de la ATP.

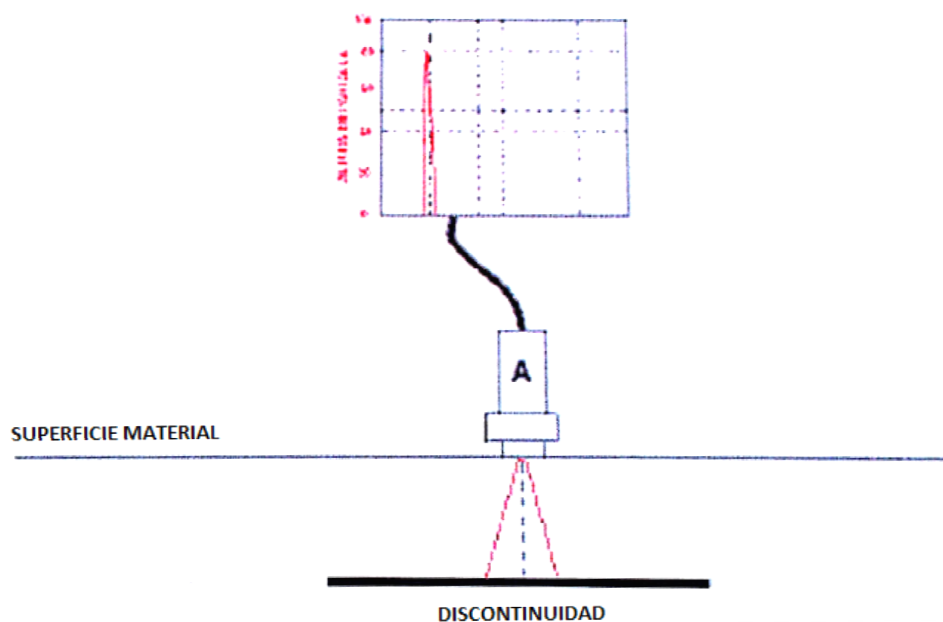


Figura 5.48 Medición de la discontinuidad (Paso 1)

2. Desplazar el palpador hasta que se observe que el eco producido por la discontinuidad alcanza la mitad de la altura máxima, en este caso el 40% de la ATP. En ese momento realizamos una marca sobre el material desde la mitad de la base del palpador, con esto se consigue identificar un extremo de la discontinuidad.

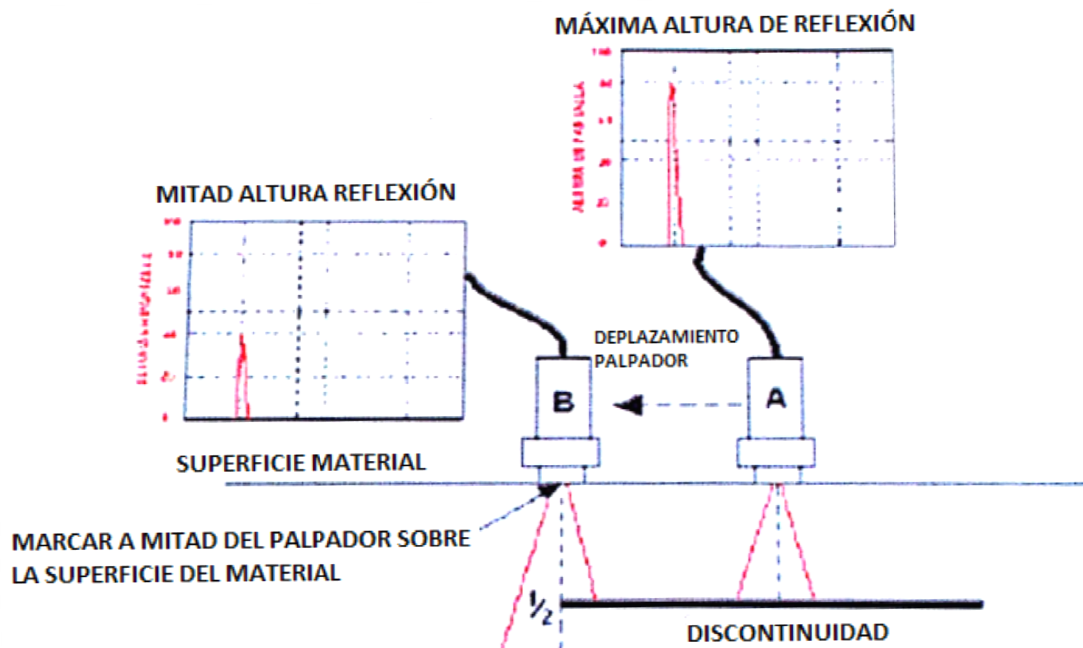


Figura 5.50 Medición de la discontinuidad (Paso 2)

3. Se vuelve a realizar el desplazamiento pero en sentido contrario al anterior y se marca el otro extremo de la discontinuidad.

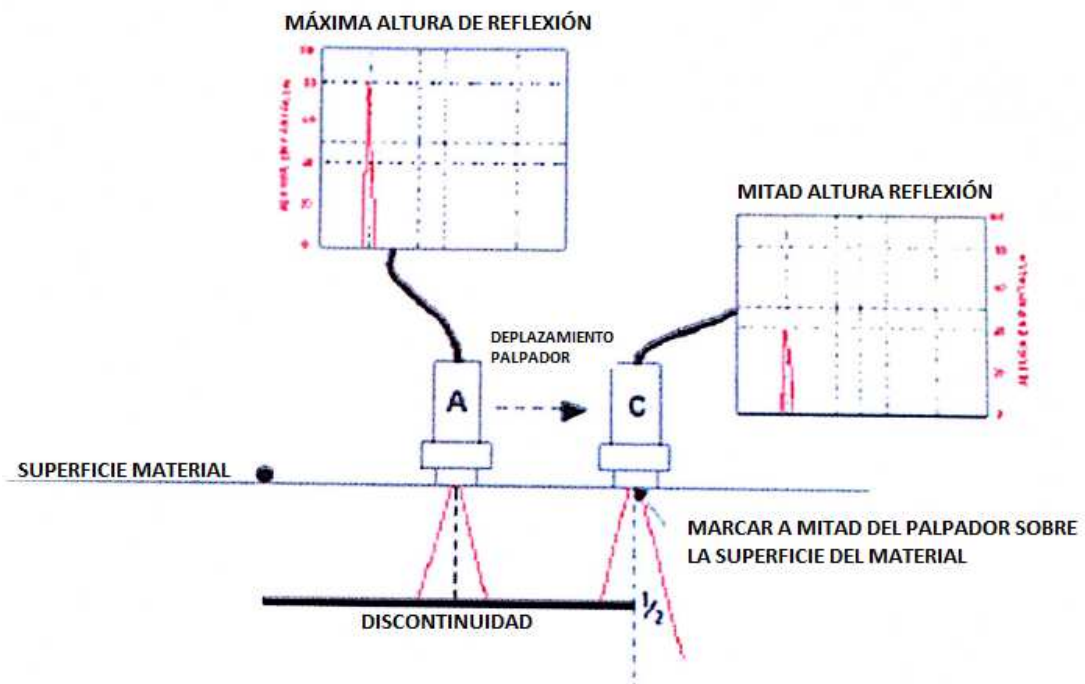


Figura 5.50 Medición de la discontinuidad (Paso 3)

4. Realizamos la medición entre marcas realizadas en el material y cuantificamos la extensión. De esta manera se termina con el proceso de medición.

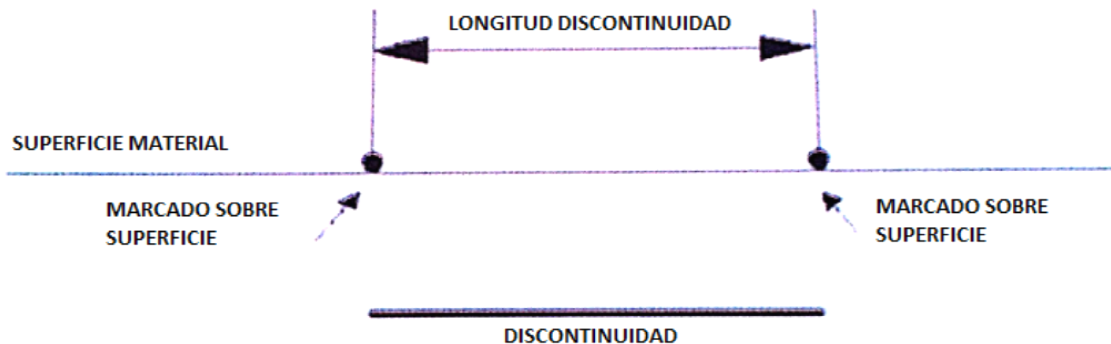


Figura 5.51 Medición de la discontinuidad (Paso 4)

5. Las discontinuidades se pueden presentar de formas muy variadas, con lo cual para asegurar la correcta inspección, este proceso se debe realizar en varias direcciones y desde distintos planos de proyección, con lo que se podrá conocer la geometría de la discontinuidad.

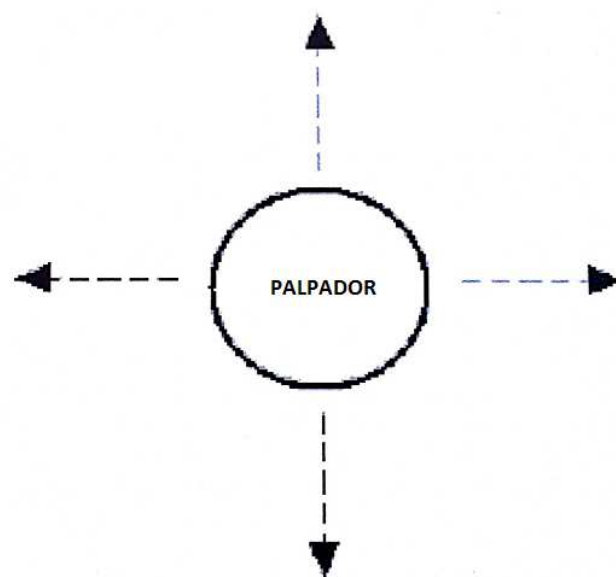


Figura 5.52 Medición de la discontinuidad (Paso 5)

Este es el método empleado por CAF para la determinación de discontinuidades subsuperficiales en la banda de rodadura de las unidades Civia. Sin embargo existen otros métodos y/o parámetros que no tienen que coincidir con estos.

A modo de ejemplo y para mostrar imágenes reales de ensayos de ultrasonidos, se ilustran a continuación los resultados obtenidos por palpadores EMAT [2].



Figura 5.53 Rueda con plano e imagen obtenida con palpadores EMAT



Figura 5.54 Rueda con pequeñas coqueas e imagen obtenida con palpadores EMAT

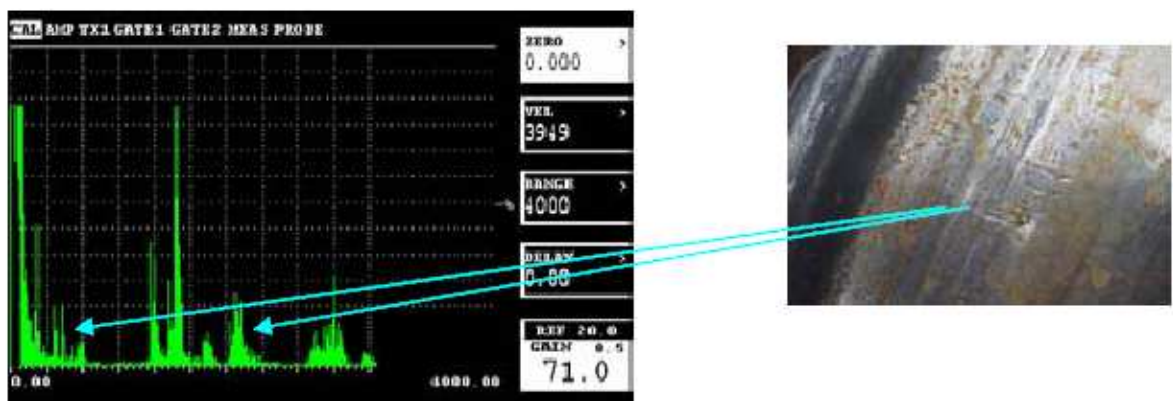


Figura 5.55 Rueda con la banda de rodadura marcada por golpes e imagen obtenida con palpadores EMAT

5.11.4 Preparación de informes

Una vez que se han realizado todas las inspecciones por ultrasonidos que requiera la unidad, es necesario la elaboración de informes en los que se especifiquen todas las anomalías encontradas, ya que de esto depende en gran medida el correcto seguimiento de las fisuras y la programación de los periodos de inspección en el futuro para intentar ocasionar el menor perjuicio al servicio de esa unidad.

Hay varios tipos de documentos [17], por ejemplo en la figura 5.56 se muestra un informe del Civia de Madrid número 17, en concreto de la rueda derecha del 5º eje, es decir, es un informe particular para una rueda bien definida. También tenemos en la tabla 5.2 un informe realizado por CAF recopilatorio de todos los defectos encontrados en las distintas unidades Civia de Madrid para una revisión programada cada 40.000 Km, en este documento también se especifica entre defectos puntuales y no puntuales y se añade un bloque de observaciones por si se detectase alguna discontinuidad que haya que controlar con más detenimiento.

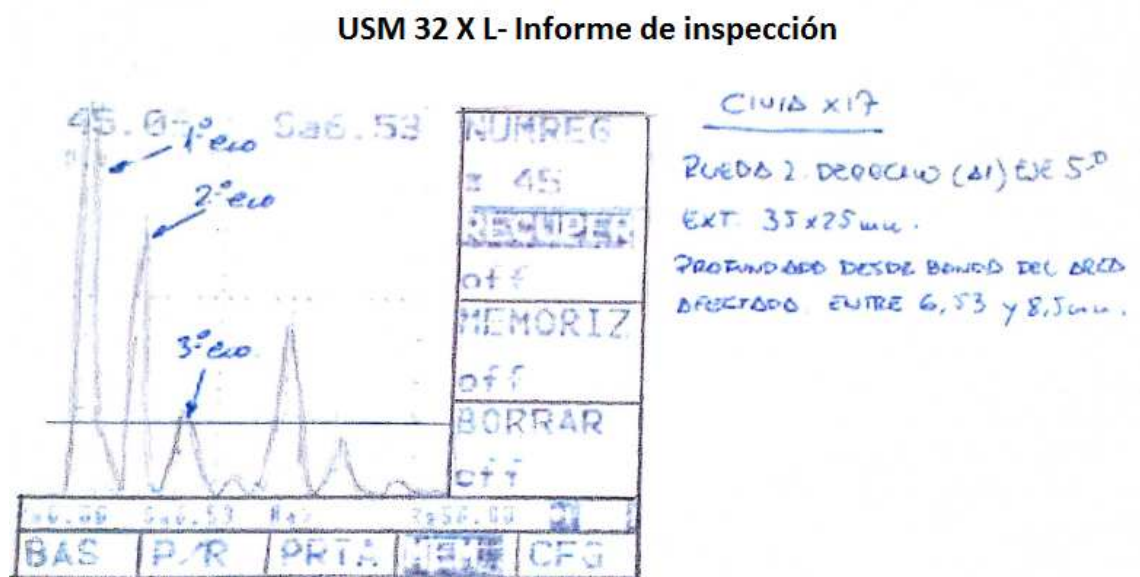



Figura 5.56 Informe de rueda derecha, 5º eje Civia nº 17

	SEGUIMIENTO REFLECTORES DETECTADOS POR ULTRASONIDOS EN UNIDADES CIVIA (REALIZAR EN CADA REVISIÓN DE MANTENIMIENTO)	SITUACIÓN AL: 4/12/07
		Pag 1 de 2

RUEDAS CON SEGUIMIENTO ESPECIAL DEBIDO A LA EXTENSIÓN DEL REFLECTOR									
UNIDAD CIVIA	FECHA DETECCIÓN	KILOMETROS DETECCIÓN	ELEMENTO	Nº EJE	LADO DESDE A1	LADO ATOCHA-PARLA	LOCALIZACIÓN	CARACTERÍSTICAS DEL REFLECTOR	OBSERVACIONES DE INTERÉS
X01	28/11/2007	629.471	Rueda	5º Eje	Derecho	Izquierdo	Banda rodadura	Sub-superficial = 1,77mm. Extensión aprox. 12mm X 8mm.	Seguimiento especial para observar su evolución, y/o sustituir eje montado. RSEP
X04	17/10/2007	674.795	Rueda	9º Eje	izquierdo	Izquierdo	Banda rodadura	Sub-superficial = 8,89mm. Extensión aprox. 15mm X 15mm.	Seguimiento especial para observar su evolución, y/o sustituir eje montado. RSEP
X16	18/07/2007	106.395	Rueda	9º Eje	Derecho	Izquierdo	Banda rodadura	Sub-superficial = 13mm. Extensión aprox. 18mm X 15mm.	Seguimiento especial para observar su evolución, y/o sustituir eje montado. RSEP
X17	02/05/2007	61.308	Rueda	5º Eje	Derecho	Izquierdo	Banda rodadura	Sub-superficial = 6,53mm. Extensión aprox. 35mm X 25mm.	Seguimiento especial para observar su evolución, y/o sustituir eje montado. RCEP Petición de eje para sustitución. Zona afectada en profundidad desde banda entre 6,53mm y 8,5mm.
X19	26/10/2007	119.796	Rueda	5º Eje	Izquierdo	Derecho	Banda rodadura	Sub-superficial = 10,84mm. Extensión aprox. 10mm X 15mm.	Seguimiento especial para observar su evolución, y/o sustituir eje montado. RCEP
	26/10/2007	119.796	Rueda	7º Eje	Izquierdo	Derecho	Banda rodadura	Sub-superficial = 8,43mm. Extensión aprox. 12mm X 15mm.	Seguimiento especial para observar su evolución, y/o sustituir eje montado. RCEP
X20	25/10/2007	125.618	Rueda	6º Eje	Izquierdo	Derecho	Banda rodadura	Sub-superficial = 13,60mm. Extensión aprox. 15mm X 10mm.	Seguimiento especial para observar su evolución, y/o sustituir eje montado. RSEP
X21	31/11/2007	151.377	Rueda	7º Eje	Izquierdo	Derecho	Banda rodadura	Sub-superficial = 8,66mm. Extensión aprox. 8mm X 12mm.	Seguimiento especial para observar su evolución, y/o sustituir eje montado. RSEP Hablar con Bobadilla de la grafica.
X22	31/11/2007	150.619	Rueda	3º Eje	Izquierdo	Derecho	Banda rodadura	Sub-superficial = 6,50 mm. Extensión aprox. 40mm X 35mm.	Seguimiento especial para observar su evolución, y/o sustituir eje montado. RCEP Petición de eje para sustitución. Zona afectada en profundidad desde banda entre 6,50mm y 10,5mm.
X23	06/11/2007	105.705	Rueda	6º Eje	Derecho	Izquierdo	Banda rodadura	Sub-superficial = 3,86mm. Extensión aprox. 20mm X 10mm.	Seguimiento especial para observar su evolución, y/o sustituir eje montado. RSEP

Tabla 5.2 Informe resumen de ultrasonidos realizado por CAF de unidades Civia de Madrid. El dato marcado en amarillo se corresponde con la información de la figura 5.54

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

A continuación se exponen las conclusiones más importantes extraídas del Trabajo Fin de Grado:

- La importancia de la rueda ferroviaria como parte fundamental de un tren, destacando la importancia de un correcto mantenimiento predictivo que nos impida llegar a situaciones críticas de descarrilamiento.
- El proceso de fabricación de las ruedas es un aspecto a controlar importante, siendo el lugar donde las inclusiones y defectos aparecen por primera vez, por lo que una mejora de los procesos y de la calidad redundará en una mejora del comportamiento de la rueda ferroviaria.
- Los tipos de daño en las ruedas son muy variados y dependen de muchos factores que no siempre se pueden controlar al 100%, por lo que un conocimiento de estos nos hará tomar las decisiones correctas para prevenirlos, destacando los producidos por desgaste en la banda de rodadura y la pestaña, por fatiga como el “Rolling Contact Fatigue” y por deformaciones como los planos en las ruedas.
- La mecánica de la fractura aplicada a las ruedas ferroviarias es un tema de reciente aplicación, por lo que el conocimiento preciso de los sistemas de fractura mejorará los materiales que se elegirán para la fabricación de las ruedas.
- El mantenimiento de las ruedas ferroviarias es imprescindible para evitar fallos catastróficos, y una parte importante de este mantenimiento son los ensayos no destructivos.
- De todas las técnicas de ensayos no destructivos aplicadas a las ruedas ferroviarias, la más importante a día de hoy es la técnica de ultrasonidos, esta es la que usan la mayoría de las empresas importantes para la detección de fisuras, ya que es la que resulta más rentable.

- Los avances en vibraciones que se realizan actualmente comienzan a dar sus frutos, como es el caso del plano analizado por vibraciones que dio unos resultados positivos.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

El campo de los ensayos no destructivos sigue en constante evolución, por lo que los trabajos futuros irán encaminados a que estos métodos resulten más eficaces y económicamente más rentables, como por ejemplo:

- Estudio de los defectos que se producen en la fabricación de ruedas ferroviarias, mejorando la calidad del acero así como sus propiedades mecánicas para conseguir una mayor vida útil de la rueda.
- Evolución de la mecánica de la fractura asociada a las ruedas ferroviarias, puesto que es de reciente aplicación y se necesita un conocimiento más exhaustivo.
- Evolución de la técnica de vibraciones aplicadas a ruedas ferroviarias, de manera que pueda competir con las técnicas de ultrasonido.
- Mejora en las técnicas ultrasónicas para conseguir mayor eficacia, de forma que se pueda reducir el tiempo de inspección y los costes mediante un proceso más automatizado.

CAPÍTULO 7: REFERENCIAS

- [1] Apuntes de la asignatura Ferrocarriles. 5º Ingeniería Industrial Universidad Carlos III de Madrid
- [2] MOLINA, Belén. *Estudio de la creación, desarrollo y método de detección de grietas en ruedas ferroviarias*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Octubre, 2006.
- [3] GARCÍA, Joaquín. *Medición de Parámetros de rodadura en Ramas Alaris UT-490*. Edición 0. Departamento de Ingeniería, Alstom. Octubre, 1999.
- [4] KOPPERS, Ulrich (2007) *State of the art wheel production. Latest equipment and technology*. 15th International Wheelset Congress, Praga (República Checa), 23-27 Septiembre 2007.
- [5] UIC 812-3 (5ª Edición, 1984) *Especificación Técnica para el suministro de ruedas monobloque de acero no aleado laminado para el material rodante motor y remolcado*.
- [6] HERREROS, Arturo. *Estudio de la defectología en ruedas ferroviarias*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid. Abril, 2010.
- [7] DIENER, M., SPEIDEL, M.O.: *Bruch eines Eisenbahn-Vollrades, Untersuchungsbericht*, Inst. für Metallforschung, ETH Zürich, Oktober 1991.
- [8] ORE FRAGE B 169, *Thermische Grenzen der Räder und Bremsklötze*, Bericht Nr. 3: Erforschung der Bruchschwelle, Oktober 1991.
- [9] DIENER, M., KUNNES, W., MÜLLER, R., *Bruchzähigkeit von Eisenbahnradern und Methoden zu ihrer Bestimmung*, ORE DT 251 (Question B 169), Oct. 1991.
- [10] FERNANDEZ SUSMOZAS, Ángel. *Estudio de fisuras en ruedas ferroviarias y del reperfilado en vehículos Civia*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid. Enero, 2009.
- [11] ASTM E 399: *Standard test method for plain-strain fracture toughness of metallic materials*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03. 01 (Revision 05), Philadelphia, 2005
- [12] Apuntes de la asignatura Mecánica de Sólidos. 4º Grado Ingeniería Mecánica Universidad Carlos III de Madrid
- [13] Apuntes de la asignatura Tecnología de Materiales. 3º Grado Ingeniería Mecánica Universidad Carlos III de Madrid

- [14] Apuntes de la asignatura Mantenimiento y Diagnóstico de Máquinas. 4º Grado Ingeniería Mecánica Universidad Carlos III de Madrid
- [15] JORDI, L., PUIG, J., CARDONA, S. FLÓREZ, E. G. *Evaluación de la severidad de un plano en la superficie de rodadura de las ruedas de un tren*. Dpt. Enginyeria Mecànica. Universitat Politècnica de Catalunya. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.
- [16] UGUINA, Luis M. *Guía práctica de medición de discontinuidades por ultrasonidos*. Departamento de calidad M.I. de la empresa CAF. Julio, 2008.
- [17] RENFE. Tutor Trabajo Fin de Grado.
- [18] RAYMOND A. SERWAY, John W. Jewett. *Electricidad y Magnetismo*. Ed. Paraninfo. 2006
- [19] FERRER, Carlos, AMIGO, Vicente. *Tecnología de Materiales*, Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de Publicación, 2003.
- [20] GONZÁLEZ ARIAS, ARNALDO. *¿Qué es el magnetismo?*, Universidad de Salamanca. Ed. Universidad de Salamanca, 2001.
- [21] Apuntes de la asignatura Ciencia e Ingeniería de Materiales. 2º Grado Ingeniería Mecánica Universidad Carlos III de Madrid.
- [22] Apuntes de la asignatura Diseño Industrial. 4º Grado Ingeniería Mecánica Universidad Carlos III de Madrid.
- [23] TIPLER, Paul Allen, MOSCA, Gene. *Física para la Ciencia y la Tecnología* (Vol. I) (5ªEd.).
- [24] CARRIÓN VIRAMONTES, Francisco J. *Evaluación no destructiva de materiales Estructurales y Puentes*
- [25] PEREDO, Álvarez, FERNANDO, Alberto. *Posicionamiento Ultrasónico*. Ciria Udlap
- [26] RECALDE GONZALO, Federico. *Ensayos no destructivos*. Elementos de Máquinas, 2009
- [27] GUTIÉRREZ, Antonio. *Ultrasonidos*. Cap. 2, 3 y 4. Scribd
- [28] GUERRA, CHACÓN, E., LAFONT, P., ECHÁVARRI, *Cálculo de la resistencia a la fatiga superficial en superficies con lubricación elastohidrodinámica mediante el criterio de Dang Van*. Universidad Politécnica de Madrid.

- [29] EKBERG, A. *Rolling contact fatigue of railway wheels and rails*.
- [30] GHIDINI A. *Mechanical behavior of materials for railways solid wheels*.
- [31] DIENER, M., GHIDINI, A., FORCELL, R., SCHNEIDER, J. (2007) *Development of testing methodologies according to fracture mechanics criteria applied to railways solid wheels*. 15th International Wheelset Congress, Praga, 23-27 Septiembre 2007.
- [32] DIENER, M., GHIDINI, A., FORCELL, R., SCHNEIDER, J. (2007) *Fracture mechanics applied to the railways solid wheels manufacturing process*. 15th International Wheelset Congress, Praga, 23-27 Septiembre 2007.